

Travail de Bachelor 2014

Combien coûte l'électricité produite par le photovoltaïque (PV) en Suisse ?

Situation, analyse des coûts détaillée et comparaison avec l'Allemagne



Etudiant-e : David Monnet

Professeur : Alain Briguet

Source de l'illustration de la page de titre

<http://cdn.pratique.fr/sites/default/files/articles/energie-photovoltaïque.jpg>

Résumé

Le but de ce travail est d'évaluer la rentabilité et le potentiel des installations photovoltaïques afin de voir si cette technologie peut remplacer le nucléaire en Suisse. Après avoir présenté les concepts de bases relatifs à l'énergie électrique d'origine solaire, j'ai détaillé la situation suisse et introduit brièvement la situation allemande afin d'observer les différences entre les deux pays. Les alternatives aux nucléaires ainsi que leurs potentiels en Suisse ont également été exposés. Par la suite, l'évolution des coûts du photovoltaïque a été analysée afin de pouvoir procéder aux calculs relatifs au rendement de différentes installations. Enfin, j'ai étudié l'impact du développement de l'énergie photovoltaïque sur l'offre d'électricité et les défis en découlant. La recherche documentaire a été privilégiée pour la rédaction de ce rapport. Des précisions ont été demandées à des spécialistes en fonction des besoins.

La sortie du nucléaire est un défi majeur pour le secteur énergétique suisse. Son remplacement par des énergies renouvelables est possible mais requiert des changements à plusieurs niveaux. Par ailleurs, la baisse du coût du photovoltaïque rend cette technologie plus accessible. Son utilisation est également encouragée par la rétribution à prix coûtant du courant injecté et par la rétribution unique, même si cette dernière est pour l'instant moins avantageuse en raison du faible prix de l'électricité. Le potentiel de l'énergie solaire est réel mais son développement dépend de la volonté des politiciens en ce qui concerne la rénovation des réseaux de distribution, l'augmentation des capacités de stockage et la promotion de ce moyen de production à l'aide d'incitations.

Mots clés : photovoltaïque, sortie du nucléaire, coûts et rendements, production d'électricité, énergies renouvelables.

Avant-propos et remerciements

Avec la sortie du nucléaire, la Suisse se trouve à un tournant énergétique. Elle se doit de trouver des alternatives afin de pouvoir continuer à satisfaire la demande d'électricité sans augmenter sa dépendance aux importations. L'énergie photovoltaïque possède un fort potentiel et a vu ses coûts fortement baisser ces dernières années. Le but de cette recherche est d'évaluer l'intérêt du développement de cette technologie, sa rentabilité et ses impacts sur la production d'électricité.

Au cours de ce travail, la situation suisse a été analysée en détail puis comparée avec un aperçu de ce qui se fait en Allemagne. L'intérêt de cette démarche est de mettre en évidence les différences entre un pays qui souhaite sortir du nucléaire depuis 2002 (l'Allemagne) et un autre depuis 2011 (la Suisse). Les limites se situent au niveau de la précision des calculs relatifs aux coûts des installations suisses. Les cas choisis ont été jugés représentatifs et ne donnent qu'une indication des rendements que l'on peut attendre d'une installation. De plus, le modèle calcule la rentabilité en utilisant un prix de l'électricité fixe sur la durée d'utilisation, ce qui n'est pas le cas réellement car ce dernier suit l'évolution des cours boursiers. Par ailleurs, les estimations du développement de la technologie photovoltaïque reposent sur des hypothèses et ne garantissent pas que les résultats présentés soient effectivement atteints. Les principales difficultés rencontrées sont les divergences de résultats entre les différentes études et l'accès à certains chiffres ou données, comme l'historique de la composition du prix d'une installation.

Je remercie les personnes suivantes pour le rôle qu'elles ont joué dans la rédaction de ce travail : le Dr Christoph Ellert, qui a proposé ce sujet, pour ses précisions apportées à la partie technique et ses recommandations; M. Alain Briguët, qui m'a suivi en tant que référent d'école et m'a prodigué ses conseils pour les calculs de coûts et rendements ainsi que pour la structure du travail ; Mme Marion Schild pour son soutien et ses nombreuses relectures. Merci également à Mme Laura Antonini (spécialiste des énergies renouvelables auprès de l'OFFEN) et MM. Ludovic Roussin (conseiller énergie ESR), Guy Jacquemet (ingénieur auprès du service de l'hydraulique et des forces motrices valaisannes), David Stickelberger (directeur chez Swissolar) et Laurent Borella (directeur du Technopôle de Sierre) pour les réponses apportées à mes questions.

Table des matières

Liste des tableaux.....	v
Liste des figures.....	vi
Liste des équations.....	vii
Liste des abréviations.....	viii
Introduction.....	1
1. Concepts techniques.....	2
1.1 Différence entre puissance et énergie.....	2
1.2 Utilisations de l'énergie solaire.....	5
1.3 Installations solaires photovoltaïques.....	6
2. Situation en Suisse.....	11
2.1 Production d'énergie électrique.....	11
2.2 Politique énergétique.....	13
2.3 Les alternatives au nucléaire.....	15
2.3.1 L'énergie hydraulique.....	16
2.3.2 L'énergie éolienne.....	18
2.3.3 Le solaire photovoltaïque.....	20
2.3.4 L'importation d'électricité.....	23
2.4 Distribution et subventionnement du courant renouvelable.....	24
2.5 Le stockage d'électricité.....	26
3. Situation en Allemagne.....	30
3.1 Production d'électricité.....	30
3.2 Stratégie énergétique.....	31
3.3 Les énergies renouvelables.....	32
3.3.1 Erneuerbare-Energien-Gesetz.....	32
3.3.2 L'énergie éolienne.....	34
3.3.3 L'énergie solaire photovoltaïque.....	34
3.3.4 L'énergie hydraulique.....	35
3.4 Réseau et distribution.....	36
4. Calcul des coûts.....	39
4.1 Coût d'une installation solaire photovoltaïque.....	39
4.2 Suisse.....	41
4.2.1 Evolution des prix.....	41
4.2.2 Méthodologie.....	43

4.2.3 Indicateurs financiers.....	44
4.2.4 Cas de base : installation de 3 kWc subventionnée.....	48
4.2.5 Rendements des autres installations.....	53
4.3 Allemagne	56
4.3.1 Évolution des prix	57
4.3.2 Parité réseau	59
5. L'avenir du photovoltaïque en Suisse	61
5.1 Remplacer le nucléaire.....	61
5.2 Impacts du photovoltaïque sur la production d'électricité suisse	63
5.2.1 Modifications du réseau	63
5.2.2 Le défi du stockage	63
Conclusion	68
Bibliographie	70
Annexes	75
Annexe I : Historique de la production d'électricité en Suisse.....	75
Annexe II : Période d'exploitation des centrales nucléaires	76
Annexe III : Production brut d'électricité en Allemagne	78
Annexe IV : Chiffres clés PV en Allemagne (2013)	79
Annexe V : Démocratisation du PV dans le monde.....	80
Annexe VI : Détails des calculs pour les installations.....	81
Annexe VII : Réseau de transport suisse	85
Déclaration de l'auteur.....	86
Commentaires du jury.....	86

Liste des tableaux

Tableau 1 : Synthèse du système d'unité international	3
Tableau 2: Différentes utilisations de l'énergie solaire.....	5
Tableau 3 : Rendement des modules par type de cellules.....	8
Tableau 4 : Importation et exportation d'énergie électrique.....	23
Tableau 5 : Composition du réseau électrique allemand fin 2012.....	36
Tableau 6: Autres indicateurs utilisés.....	47
Tableau 7 : Données techniques pour une installation de 3 kWc	48
Tableau 8 : Données financières pour une installation de 3 kWc	50
Tableau 9 : Achat/vente d'électricité et fiscalité pour une installation de 3 kWc.....	51
Tableau 10 : Résultats financiers pour une installation de 3 kWc.....	52
Tableau 11 : Synthèse des résultats pour chaque installation	54
Tableau 12 : Tarifs ESR 2013-2014.....	55
Tableau 13 : Potentiel de développement en TWh des substituts au nucléaire d'ici 2050	61
Tableau 14 : Projets de stations de pompage-turbinage en Suisse.....	64

Liste des figures

Figure 1 : Production d'énergie solaire sur une journée	4
Figure 2 : L'effet photovoltaïque.....	6
Figure 3 : Composition d'une installation photovoltaïque connectée au réseau	7
Figure 4 : Installation photovoltaïque isolée	9
Figure 5: Évolution de la production d'énergie électrique en Suisse	11
Figure 6 : Production d'énergie électrique en Suisse pour l'année 2012	12
Figure 7 : Production et consommation d'électricité en Suisse, 2012	13
Figure 8 : Vitesse moyenne du vent, 50 m au-dessus du sol (2011)	19
Figure 9 : Superficie nécessaire pour produire 20% d'électricité PV	22
Figure 10 : Système d'encouragement au PV en Suisse	26
Figure 11 : Utilisation de l'énergie stockée produite par une installation photovoltaïque.....	27
Figure 12 : Fonctionnement d'une station de pompage-turbinage	28
Figure 13 : Composition d'une installation de stockage par air comprimé.....	28
Figure 14 : Production brut d'énergie électrique en Allemagne (2012)	30
Figure 15 : Énergie électrique renouvelable produite en Allemagne entre 1990 et 2011	33
Figure 16 : Composition du prix d'une installation photovoltaïque en 2006.....	39
Figure 17 : Composition du prix d'une installation photovoltaïque en 2014.....	40
Figure 18 : Marché du photovoltaïque en Suisse	42
Figure 19 : Évolution du prix de l'énergie électrique solaire en Suisse	42
Figure 20 : Estimation de production pour une installation de 3 kWc située à Sion	49
Figure 21 : Évolution de l'investissement d'une installation de 3 kWc	53
Figure 22 : Production d'énergie électrique photovoltaïque en Allemagne	56
Figure 23 : Évolution du prix des installations PV de 10 kWc en Allemagne.....	57
Figure 24 : Prévision de l'évolution des coûts de production d'électricité en Allemagne	58
Figure 25 : Prix de l'électricité photovoltaïque comparée à celle fournie par le réseau	59
Figure 26 : Impact de la production d'énergie électrique sur l'environnement	62
Figure 27 : Répartition de la production électrique sur l'année (moyenne 2008-2011)	66

Liste des équations

Équation 1 : Déduction de la production en fonction de la puissance	3
Équation 2 : Puissance nécessaire à une production de 12 TWh/an	21
Équation 3 : Valeur actuelle nette	45
Équation 4 : Coût moyen pondéré du capital.....	47

Liste des abréviations

AEE	Agence des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique
AES	Association des entreprises électriques suisses
ALEC	Agence locale de l'énergie et du climat (Agglomération Grenobloise)
CMPC	Coût moyen pondéré du capital
CP	Communication personnelle
DENA	Deutsche Energie-Agentur
DETEC	Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EPF	Ecoles polytechniques fédérales
EPIA	European Photovoltaic Industry Association
ESR	Énergie Sion Région
FRE	Fédération romande pour l'énergie
HES	Hautes écoles spécialisées
IFSN	Inspection fédérale de la sécurité nucléaire
OEné	Ordonnance sur l'énergie
OFEN	Office fédérale de l'énergie
OFS	Office fédérale de la statistique
PME	Petites et moyennes entreprises
RPC	Rétribution à prix coûtant
SFEN	Société française d'énergie nucléaire
TAR	Taxe anticipée de recyclage
TRI	Taux de rentabilité interne
UE	Union européenne
VAN	Valeur actuelle nette
WAAC	Weighted average cost of capital
Wc	Watt-crête
Wh	Watt-heure
Wp	Watt-peak

Introduction

En mars 2011, la catastrophe nucléaire de Fukushima a précipité la chute de l'énergie nucléaire. Deux mois plus tard, le Conseil fédéral annonçait la sortie progressive du nucléaire pour 2035 (Association "Sortir du nucléaire", 2011). Cette mesure a pour conséquence de pousser les politiciens suisses à réfléchir aux moyens de remplacer l'énergie produite, en particulier l'électricité, par cette technologie. Le développement d'énergies renouvelables a été identifié comme prioritaire.

Parmi ces ressources, le photovoltaïque possède un potentiel intéressant. En effet, la puissance de rayonnement du soleil en Suisse représente 220 fois la consommation d'énergie de ce pays (Agence des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique [AEE], 2010, p. 11). De plus, la baisse des coûts et les améliorations de cette technologie rendent cette alternative intéressante. Combien coûte une installation photovoltaïque ? Quelles seraient les conséquences d'un recours massif à cette forme de production ? Je tenterai de répondre à ces questions dans ce travail.

La première partie de ce rapport a pour but de présenter certaines notions techniques importantes. Elle contient notamment une présentation d'une installation photovoltaïque et de ses composants et aborde également la différence entre puissance et énergie. Ensuite, nous nous intéressons à la situation suisse : politique énergétique, production d'électricité, énergies renouvelables et subventionnement. La troisième partie présente l'actualité de l'Allemagne sur le plan énergétique et permet ainsi une comparaison entre les deux pays. Le point quatre parle de l'évolution des coûts du photovoltaïque en Suisse et en Allemagne ainsi que la rentabilité des installations en Suisse. Finalement, je conclurai en présentant l'avenir du photovoltaïque en Suisse et les impacts d'une hausse des recours aux injections stochastiques¹ sur le réseau.

¹ "Se dit de phénomènes qui, partiellement, relèvent du hasard et qui font l'objet d'une analyse statistique" (Larousse.fr). Dans notre cas, ce mot qualifie l'irrégularité et l'impossibilité de programmer des injections.

1. Concepts techniques

Le but de ce travail est de définir la position actuelle de la Suisse, notamment au niveau des coûts et des rendements de l'énergie photovoltaïque, en comparant la situation de notre pays à celle de l'Allemagne. Le point de vue technique ne sera traité que s'il se révèle nécessaire à une meilleure compréhension de l'une ou l'autre des parties. Néanmoins, l'acquisition de certaines connaissances de base est nécessaire afin d'assimiler plus facilement le contenu de ce travail.

1.1 Différence entre puissance et énergie

Ce point est un élément clé pour effectuer les calculs relatifs à la production et aux coûts. Comprendre les différences entre ces deux notions s'avère essentiel, d'autant que l'utilisation d'abréviations peut rendre confus le lecteur non-familiarisé avec le sujet.

Puissance

"La puissance représente la capacité de fournir/consommer un travail/de l'énergie durant un intervalle de temps" (PHD C. Ellert, Professeur HES, communication personnelle, 21 mai 2014). Elle est solution de l'énergie (E) et du temps écoulé (t) : $P=E/t$.

L'unité de base se référant à la puissance est le watt. Elle peut être définie de la manière suivante : "Le watt est l'énergie consommée chaque seconde par un appareil" (Services cantonaux de l'énergie et de l'environnement, 2014). Ainsi, une ampoule de 25 watts consommera autant d'énergie pendant quatre heures qu'une de 100 watts pendant une heure.

Énergie

Il existe plusieurs définitions de l'énergie en fonction du contexte. Dans le cadre de ce travail, l'énergie représente ce qui a été consommé ou produit par une installation. Elle résulte de la puissance (P) et du temps écoulé (t) : $E=P*t$

L'unité utilisée pour exprimer l'énergie est le joule (J). "Un joule représente un watt consommé/produit pendant une seconde" (C. Ellert, CP, 21 mai 2014). Quand on parle d'énergie électrique, on utilise le wattheure par mesure de simplification. Un wattheure

représente la consommation/production d'un appareil d'un watt pendant une heure. C'est sur cette quantité qu'est basé le calcul de coûts. Si un appareil fonctionnant toute la journée consomme 3 kWh par heure et que le prix du kWh est de 20 centimes, la facture d'électricité journalière se montera à 1.44 CHF.

Ces unités seront surtout utilisées dans la partie relative aux calculs des coûts et des retours sur investissements. Par ailleurs, il est également important de prendre connaissance du tableau ci-dessous afin de pouvoir comparer la taille et la puissance de différentes installations photovoltaïques.

Tableau 1 : Synthèse du système d'unité international

Quantité	Téra (T)	Giga (G)	Méga (M)	Kilo (k)	Unité	Millième
Ordre de grandeur	10^{12}	1 000 000 000	1 000 000	1000	1	10^{-3}
Puissance	Térawatt (TW)	Gigawatt (GW)	Mégawatt (MW)	Kilowatt (kW)	Watt (W)	Milliwatt
Énergie	Térawattheure (TWh)	Gigawattheure (GWh)	Mégawattheure (MWh)	Kilowattheure (kWh)	Wattheure (Wh)	Joule

Adapté de Conversion d'unité en ligne (convertworld.com , 2014)

Pour indiquer "de production annuelle moyenne", il faut rajouter "par année" (abrégé /a) derrière la quantité d'énergie. Par exemple, si une installation produit en moyenne 2 GWh par année, il est écrit 2 GWh/a.

La production est généralement calculée en partant de la puissance de l'installation. Précisément, elle se résout sur le modèle suivant:

Équation 1 : Déduction de la production en fonction de la puissance

Puissance: 228,3105 kW

228,3105 kWh = 1 heure

2000000 kWh = 8760 heures (nombre d'heures dans une année)

2 GWh/a = 1 année

Données de l'auteur

Cette installation a donc une puissance de 228,31 kW et produit, si elle fonctionne en continu, 2 GWh/a.

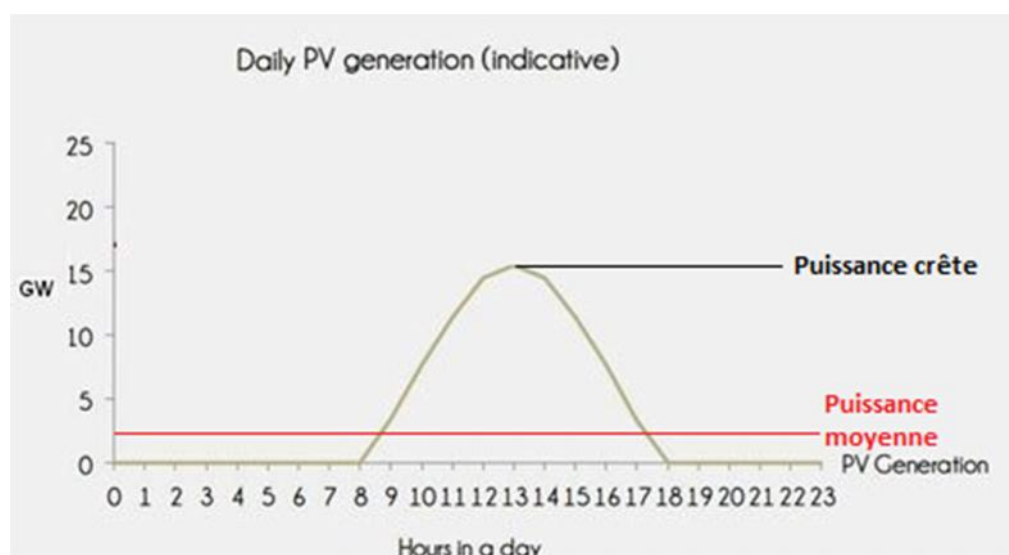
Maintenant que nous savons calculer la production en partant de la puissance, je vais présenter la relation entre ces deux éléments pour une installation photovoltaïque. Nous verrons que la puissance globale installée n'est pas représentative de la production moyenne et que cette dernière dépend de plusieurs facteurs.

Production d'une installation solaire

Pour les panneaux solaires, la puissance est indiquée en watts-crête (Wc). "Cette unité de mesure correspond à la production maximale avec un ensoleillement standard de 1000 W/m² par une température de 25°C" (Riolet, 2011, p. 12). La puissance globale d'une installation sera généralement exprimée en kilowatts-crête (KWc) ou en kilowatts peak (kWp).

La production effective ne correspond pas à la puissance globale d'une installation. Cette dernière indique la capacité des panneaux solaires exposés à des conditions optimales en continu. En réalité, la production fluctue en fonction de plusieurs éléments : le moment de la journée, la saison, le temps,... Ces facteurs nuisent au rendement d'une installation photovoltaïque. Ainsi, la production moyenne correspond à environ 1/8 de la puissance globale (C. Ellert, CP, 21 mai 2014).

Figure 1 : Production d'énergie solaire sur une journée



Adapté de Photovoltaïque (enjeuxenergies.wordpress.com, 2014)

Par ailleurs, la productivité dépend également fortement du lieu où est située l'installation. Sur une période d'une année, 1 kWc de panneaux installés à Sion (Suisse) produirait environ 1300 kWh. En Suède et dans le Sahara, la même installation aurait généré respectivement 900 kWh et 1600 kWh (C. Ellert, CP, 21 mai 2014). Nous constatons donc que certains lieux sont naturellement plus favorables que d'autres pour la production d'énergie électrique d'origine solaire.

1.2 Utilisations de l'énergie solaire

L'énergie dégagée par le soleil peut être utilisée de différentes manières. Il est important de différencier la production d'énergie électrique de la production de chaleur. Le tableau suivant, tiré du livre *L'énergie solaire après Fukushima : la nouvelle donne* (Boisgibault, 2011, p. 10), illustre les différentes utilisations qui peuvent être faites de l'énergie solaire.

Tableau 2: Différentes utilisations de l'énergie solaire

Production d'électricité	Procédé
L'énergie solaire photovoltaïque	Convertit les photons en électrons, grâce à la cellule photovoltaïque.
L'énergie solaire thermodynamique ou solaire à concentration	Concentre par des miroirs les rayons du soleil sur un point focal qui chauffe un liquide caloporteur à très haute température. Ce liquide peut être envoyé dans une chaudière pour transformer l'eau en vapeur, faire tourner des turbines ou produire de l'électricité par moteur à énergie
Production de chaleur	Procédé
L'énergie solaire thermique	Transforme le rayonnement solaire en énergie thermique pour l'eau sanitaire et le chauffage.

Source : L'énergie solaire après Fukushima : La nouvelle donne (Boisgibault, 2011, p. 10)

Ce travail sera axé sur l'énergie solaire photovoltaïque. Les autres utilisations possibles ne seront pas abordées.

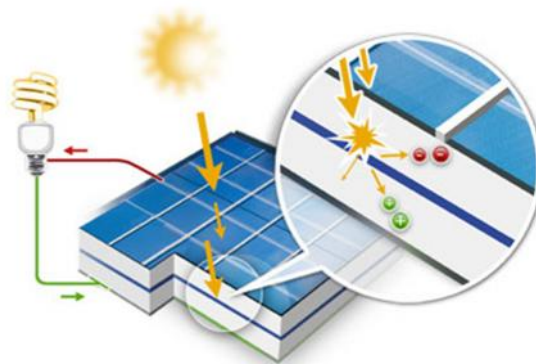
1.3 Installations solaires photovoltaïques

Dans cette partie, je commencerai par présenter brièvement le phénomène permettant la transformation des rayons du soleil en électricité. Les différents composants d'une installation ainsi que les formes d'exploitation possibles seront également introduits.

L'effet photovoltaïque

Le processus de création d'électricité à partir de lumière réalisé dans ce type d'installation peut être expliqué ainsi : la lumière, composée de photons, heurte la surface des panneaux. Les électrons présents sur cette dernière vont alors se mettre en mouvement en se détachant des atomes de silicium et ainsi générer du courant électrique. La quantité d'électricité produite est relative au nombre de photons qui traversent la cellule. Les cellules sont reliées et forment des modules photovoltaïques, qui sont eux-mêmes couplés à un onduleur (Amjahdi & Lemale, 2011, p. 99). Ce processus est illustré par l'image suivante :

Figure 2 : L'effet photovoltaïque



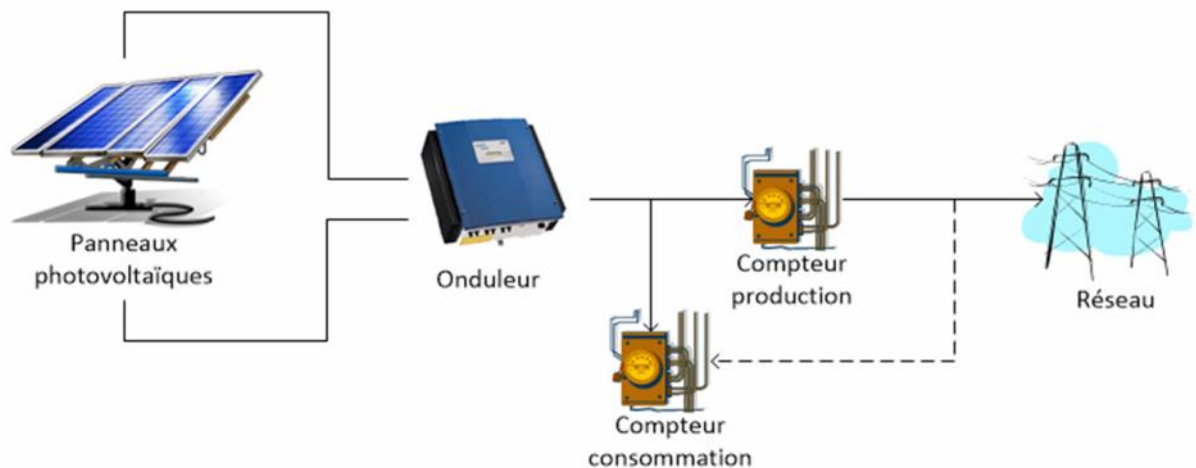
Source : L'effet photovoltaïque (Photovoltaïque.info, 2012)

Composition d'une installation photovoltaïque

Avant de présenter en détail les composants d'une installation photovoltaïque, il est nécessaire de comprendre le fonctionnement du système dans son ensemble. Les rayons du soleil sont captés par les panneaux sous forme de courant continu. Ce dernier est acheminé jusqu'à l'onduleur où il sera transformé en courant alternatif. À ce stade, le propriétaire a le choix entre deux options : consommer directement l'énergie électrique produite ou la revendre à un distributeur au tarif fixé. Si l'installation n'est pas connectée au réseau,

l'énergie produite qui n'est pas consommée sera conservée au moyen d'une technique de stockage.

Figure 3 : Composition d'une installation photovoltaïque connectée au réseau



Données de l'auteur

Les cellules

On distingue plusieurs types de cellules. 85% de celles présentes sur le marché sont créées grâce au silicium cristallin. Les cellules en couche mince, qui utilisent pour la plupart la technologie du silicium amorphe², équipent environ 10% des installations. (Swissolar, 2014a).

Les cellules en silicium cristallin sont fabriquées à partir de lingots de silicium et se divisent en deux catégories : les cellules monocristallines et les cellules polycristallines. Les cellules monocristallines sont obtenues en sciant de fines plaques d'un silicium très pur. Pour obtenir des cellules polycristallines, on coule du silicium liquide dans des blocs qui seront par la suite découpées en plaques (Swissolar, 2014a).

Les cellules en couche mince sont créées en posant sous vide sur une base (verre, métal,...) une fine couche de semi-conducteurs. La plupart du temps, le semi-conducteur utilisé est le silicium. (Amjahdi & Lemale, 2011, p. 100). D'autres matériaux sont utilisés pour la production de ce type de cellule comme le tellure de cadmium ou le sélénure de cuivre

² Le silicium amorphe est une technologie dans laquelle les atomes ne sont pas rangés de façon ordonnée, contrairement au silicium cristallin (recyconsult, 2010).

et d'indium. Les cellules sont reliées entre elles afin de constituer un module solaire. C'est cette partie de l'installation qui permet la transformation des rayons du soleil en électricité (Swissolar, 2014a). Le tableau suivant donne un aperçu du rendement des modules selon leur type.

Tableau 3 : Rendement des modules par type de cellules

Matériaux	Rendement modules commercialisés
Silicium monocristallin	12-20%
Silicium polycristallin	11-15%
Silicium amorphe	5-9%
Cellules en couche mince CIS	9-11%

Adapté de Types de cellules photovoltaïques (ecosources.info, 2013)

Les modules sont testés pour qu'ils correspondent aux standards de qualité établis par des normes internationales. Parmi ces dernières, les plus connues sont les suivantes (Swissolar, 2014a):

- Modules cristallins : IEC 61215
- Modules à couches minces : IEC 61646
- Modules PV safety qualification : IEC 61730

L'onduleur

Son rôle est de transformer le courant continu provenant des modules solaires en courant alternatif 230 volts 50 hertz identique à celui fourni par le réseau. Le choix de l'onduleur doit se faire en calculant la puissance nécessaire en panneaux en fonction de ce que l'on veut obtenir au niveau puissance et durée. Deux types d'onduleurs existent : quasi sinus ou pur sinus. Le deuxième est plus performant et doit être privilégié si l'électricité sert à alimenter du matériel sensible comme les ordinateurs (Riolet, 2011, p. 31).

Les batteries

Les batteries sont utilisées pour stocker le surplus d'énergie produit par les panneaux photovoltaïques. Elles permettront ainsi d'alimenter la structure en électricité lorsque l'installation ne produit rien, comme par exemple la nuit. Pour les installations solaires, on utilise généralement des batteries à décharge lente. Il est recommandé d'installer un régulateur entre le panneau solaire et la batterie afin d'éviter que celle-ci ne soit

endommagée. En effet, ce type de batteries supporte mal les niveaux de charge trop bas (inférieur à 40%) ou trop élevé (supérieur à 90%) (EcologieShop, 2014).

Installation isolée

Ce genre d'installations permet aux structures trop éloignées du réseau de distribution d'électricité de subvenir elles-mêmes à leurs besoins. L'électricité produite pendant la journée est stockée dans des batteries afin de permettre aux usagers d'en disposer au moment voulu. Par ailleurs, cette disposition présente également l'avantage de ne pas contraindre la société de distribution à agrandir le réseau existant, ce qui lui permet de réaliser des économies (Agence locale de l'énergie et du climat - agglomération grenobloise [ALEC], 2011).

Figure 4 : Installation photovoltaïque isolée



Source : Le solaire photovoltaïque (ALEC, 2011)

Installation raccordée au réseau

L'ALEC (Agence locale de l'énergie et du climat) détaille également sur son site internet ce type d'installations. Lorsque le système est raccordé au réseau, le courant continu produit est transformé par un onduleur en courant alternatif. Il existe à partir de là deux possibilités : soit le courant est directement consommé par les appareils électriques, soit il est injecté dans le réseau public.

En Suisse, la différence entre les coûts de production et les coûts du marché peut être compensée de deux façons : par la rétribution à prix coûtant du courant injecté (RPC) ou par la rétribution unique. Ces deux éléments, présentés en détails dans la section 2.4, permettent aux propriétaires d'amortir plus facilement leurs installations (Swissolar, 2013a).

Le fonctionnement simplifié des différents types d'installations photovoltaïques est désormais connu. Il permet, d'une part, de mieux se représenter les enjeux sur le plan national et d'autre part, de comprendre les différences de coûts qu'il peut y avoir entre chaque cas. Le premier point traitant des notions de puissance et d'énergie sera très utilisé dans la section relative au calcul de coûts.

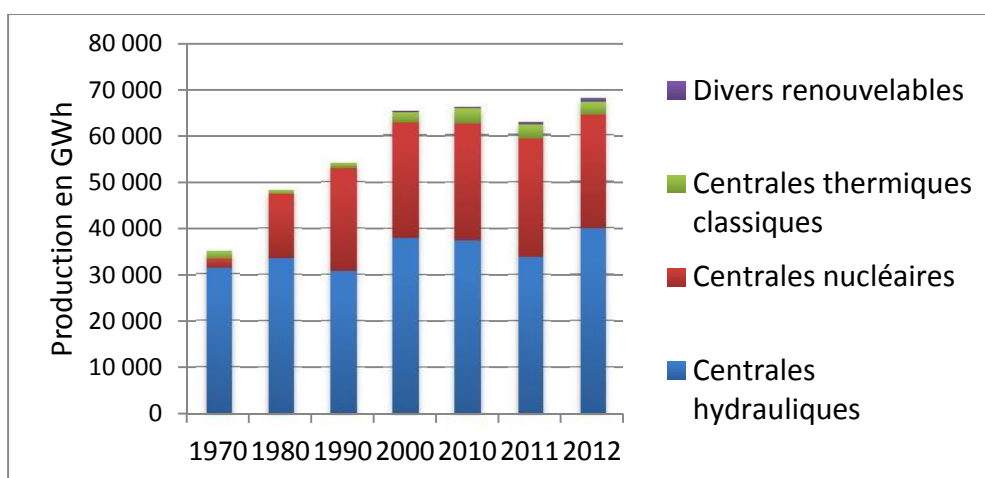
2. Situation en Suisse

Cette partie a pour but de présenter la situation actuelle en matière de production d'électricité. Les chiffres obtenus permettront de découvrir les potentiels problèmes qui pourraient voir le jour dans les années à venir et les mesures que nos autorités proposent. Ces données nous permettront également de comprendre le rôle que les énergies renouvelables, et plus particulièrement l'énergie solaire photovoltaïque, doivent remplir pour éviter une pénurie d'électricité.

2.1 Production d'énergie électrique

Selon le rapport *Statistique suisse de l'électricité 2012*, réalisé par l'Office fédérale de l'énergie (OFEN), la production d'énergie électrique en Suisse se chiffre à 65,6 milliards de kWh une fois la déduction de 2,4 milliards de kWh imputable au pompage d'accumulation effectuée. La consommation, majorée des pertes de transport et de distribution, s'est quant à elle montée à 63,4 milliards de kWh pour l'année 2012 (Office fédérale de l'énergie [OFEN], 2013, p. 2). Pour répondre à ce besoin, différents types d'installations ont été utilisés : les centrales hydroélectriques, nucléaires, thermiques classiques et renouvelables. Cette dernière section comprend les chauffages au bois et en partie au bois, les installations à biogaz, photovoltaïques et éoliennes. Le graphique ci-dessous, créé à partir d'un tableau provenant du site de l'Office fédérale de la statistique (OFS) et disponible en annexe I, illustre l'évolution de la production d'énergie électrique pour chaque type d'installation.

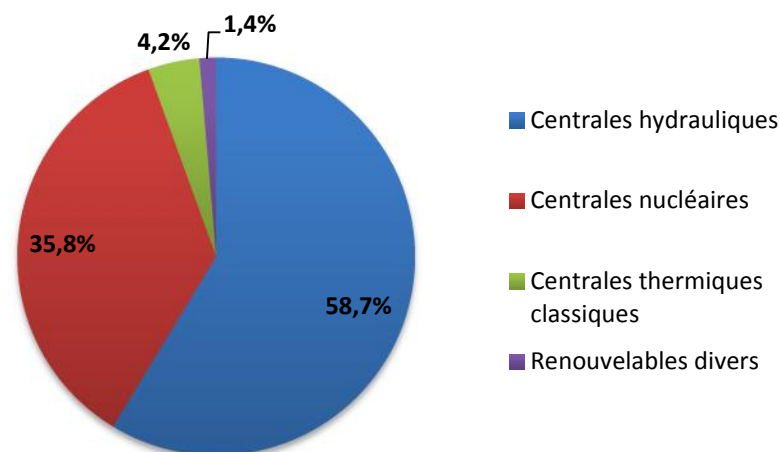
Figure 5: Évolution de la production d'énergie électrique en Suisse



Adapté de Production d'électricité (OFS, 2013)

Pour cette étude, il est pertinent de se focaliser sur les données les plus récentes. Le graphique suivant illustre la manière dont se répartit la production d'électricité entre les différentes installations pour l'année 2012. Le fait d'utiliser les pourcentages permet de mettre en valeur les technologies privilégiées. Les centrales hydroélectriques arrivent en première position avec 58,7% de la production, suivies des centrales nucléaires avec 35,8%. Nous constatons que la Suisse a privilégié ces deux types d'installations jusqu'à présent.

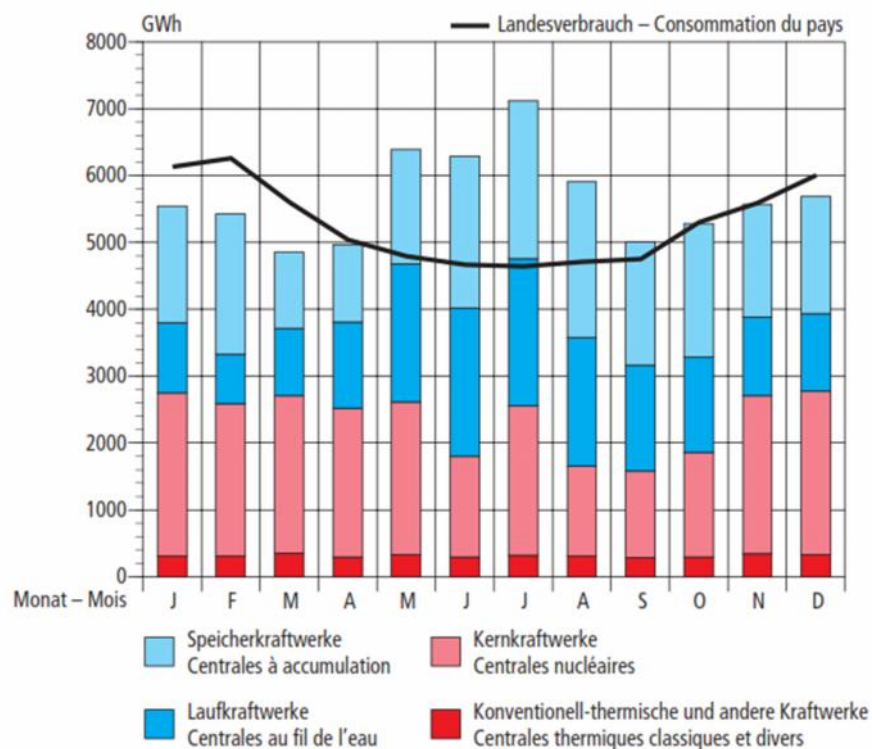
Figure 6 : Production d'énergie électrique en Suisse pour l'année 2012



Adapté de Production d'électricité (OFS, 2013)

Le dernier graphique, tiré du rapport *Graphique de la statistique suisse de l'électricité 2012*, montre la production mise en parallèle avec la consommation de notre pays. Nous pouvons constater que la consommation dépasse la production pendant les mois les plus froids, soit d'octobre à avril. Cela s'explique par l'utilisation plus intensive des chauffages et de l'éclairage en raison des températures et des jours moins longs. Par ailleurs, nous observons que l'énergie électrique d'origine nucléaire représente une part non-négligeable du total produit. D'ici 2035, cette technologie ne sera plus utilisée et devra être remplacée par d'autres sources (Office fédérale de la statistique [OFS], 2013, p. 11).

Figure 7 : Production et consommation d'électricité en Suisse, 2012



Source : Statistique suisse de l'électricité (OFEN, 2012)

Maintenant que nous connaissons la structure de l'offre d'énergie électrique en Suisse, nous allons nous intéresser à la politique énergétique de ce pays. Cela nous permettra de comprendre les enjeux et les défis auxquels il faudra faire face dans le futur.

2.2 Politique énergétique

La catastrophe de Fukushima a eu un impact important sur nos responsables politiques et les a encouragés à revoir leur position par rapport à l'énergie nucléaire. En 2011, Doris Leuthard a décidé de suspendre les procédures concernant les demandes d'autorisation pour des centrales de substitution (OFEN, 2013a). De ce fait, les cinq installations actuellement actives ne seront pas remplacées à la fin de leur durée d'utilisation (pour plus de précisions, consulter l'annexe II). Cette décision a permis de redéfinir la stratégie énergétique 2050.

Le but de ce programme est de se passer progressivement de l'énergie nucléaire en consommant moins et en produisant autrement. Le Conseil fédéral a ainsi fixé comme objectif une réduction de la consommation d'électricité de manière à ce qu'elle se chiffre à 53 TWh d'ici 2050 (Service de l'énergie et des forces hydrauliques, 2013a, p. 11).

Sur les dix dernières années, les centrales nucléaires ont produit en moyenne 39% de l'électricité de notre pays (OFEN, 2013a). Il est donc primordial de trouver des alternatives afin de maintenir l'offre d'électricité à un niveau auquel elle satisfait la demande. Pour ce faire, le Département de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC) a fixé les priorités suivantes (DETEC, 2012):

- *Baisse de la consommation d'énergie*

Avec la croissance démographique, le nombre grandissant d'appareils consommateurs d'électricité (ex. télévision, ordinateurs,...) et l'augmentation de l'électrification des transports, la demande d'électricité pourrait passer à 90 milliards de kWh en 2050 (consommation 2010 : 60 milliards de kWh). Il est donc primordial de sensibiliser les consommateurs à faire des économies en les informant au moyen du programme SuisseEnergie et en imposant des exigences minimales pour les appareils (étiquette Energie).

- *Elargissement de l'offre d'électricité*

L'hydraulique et les énergies renouvelables doivent être favorisées. Cela peut se faire principalement au moyen de la rétribution à prix coûtant du courant injecté (RPC). En parallèle, il faudra également transformer le parc de production suisse et aménager les capacités de stockage afin de s'adapter à une production plus irrégulière liée à l'énergie solaire ou éolienne.

- *Maintien des importations d'électricité*

Les importations sont nécessaires pour garantir la sécurité de l'approvisionnement. Néanmoins, le Conseil fédéral estime qu'il faut être le plus possible indépendant pour ce qui est lié à la production d'électricité.

- *Extension des réseaux électriques*

Il est nécessaire d'étendre rapidement les réseaux de transport d'électricité et de les transformer en "smart grids". Ce type de réseau permet une optimisation du système d'électricité qui amène à une réduction des coûts. Par ailleurs, la Suisse doit également veiller à accorder son réseau au futur "supergrid" qui équipera les pays européens afin de pouvoir maintenir ses exportations et importations d'électricité.

- *Intensification de la recherche*

Les recherches doivent être poursuivies afin de faciliter la restructuration du système énergétique. Il faudra pour cela encourager la collaboration entre les universités et les centres de compétences technologiques et adapter le programme des Écoles polytechniques fédérales et des Hautes écoles spécialisées dans ce domaine.

- *Exemple donné par la Confédération, les cantons et les communes*

Ces trois acteurs devront donner l'exemple en favorisant les énergies renouvelables pour satisfaire leurs besoins en électricité. Ils auront également la mission d'encourager les entreprises à adopter un comportement responsable. L'industrie de l'électricité devra elle aussi contribuer à la restructuration du système énergétique en investissant dans deux nouvelles installations qui satisferont aux nouvelles normes.

- *Rôles des projets phares*

Les projets pilotes auront pour mission de fournir des informations qui aideront les politiques à prendre les meilleures décisions pour l'avenir énergétique de la Suisse. Peuvent être cités en exemple les domaines suivants : smart buildings, smart cities, smart grids,...

- *Encouragement de la collaboration internationale*

La Suisse se doit d'être en accord avec l'Union européenne afin de favoriser l'échange d'électricité. Elle donnera également son avis sur le futur de l'énergie nucléaire au niveau international.

Nous connaissons maintenant les objectifs à atteindre en matière de politique énergétique. La section suivante présente les alternatives dont dispose la Suisse pour remplacer le volume d'électricité produite actuellement par cette technologie.

2.3 Les alternatives au nucléaire

La Suisse a pour projet de sortir progressivement du nucléaire en fermant les centrales utilisées actuellement à la fin de leur durée d'utilisation. En suivant ce modèle, notre pays se passera totalement de l'électricité produite par les centrales nucléaires dès la fermeture du réacteur de Leibstadt en 2034 (OFEN, 2013b, p. 5). Cette mesure a pour conséquence d'imposer un défi de taille à nos dirigeants : trouver des alternatives qui puissent remplacer

les 24'345 GWh, soit 35,8% de la production électrique totale issue de nos centrales (OFS, 2014a).

2.3.1 L'énergie hydraulique

De par son relief et son climat, la Suisse est un pays qui rassemble les conditions nécessaires à l'exploitation de centrales hydroélectriques (OFEN, 2013c). Avant la mise en route des centrales nucléaires en 1970, l'électricité d'origine hydraulique représentait environ 90% du total produit en Suisse. En 2012, cette part est d'environ 59%. C'est donc la première source d'énergie de notre pays. Les 556 centrales en fonction ont fourni 39'906 GWh en 2012 (OFS, 2014a). Les cantons alpins comme le Tessin, le Valais, Uri et les Grisons génèrent les deux tiers de l'électricité de source hydraulique.

Il existe trois types de centrales :

- les centrales au fil de l'eau, qui fournissent environ 47% de l'électricité d'origine hydraulique ;
- les centrales à accumulation, qui représentent environ 49% ;
- les centrales à pompage-turbinage, dont la production se monte à environ 4%.

La force hydraulique est considérée comme une alternative à l'énergie nucléaire. La Confédération a donc pris des mesures pour encourager son usage comme la rénovation et l'agrandissement des centrales existantes. De plus, la rétribution à prix coûtant du courant injecté est disponible pour les installations d'une puissance inférieure ou égale à 10 mégawatts. L'objectif est d'augmenter d'ici 2030 la production moyenne escomptée de 2'000 GWh par rapport à celle de l'année 2000. Même si ces chiffres sont atteints, cela reste néanmoins trop faible pour remplacer totalement le nucléaire. En effet, les 2'000 GWh visés ne représenteraient que 5% de l'énergie électrique produite actuellement par les centrales nucléaires (OFEN, 2013c).

Potentiel de développement

Dans le rapport *Le potentiel hydroélectrique de la Suisse*, l'OFEN a analysé le potentiel hydroélectrique pour voir si l'objectif annoncé dans la nouvelle stratégie énergétique, à savoir d'augmenter la production de quatre TWh/an pour 2050, est réalisable. Pour ce faire,

deux scénarios ont été identifiés : une évolution aux conditions actuelles et l'autre aux conditions optimisées. Cette dernière prend en compte une amélioration des installations existantes ainsi que le développement de nouvelles centrales tout en respectant les lois liées à la protection de l'environnement et les principes de développement durable. (OFEN, 2012, p. résumé).

En se basant sur les projets concrets au mois de juin 2012 et après avoir consulté toutes les parties prenantes, l'OFEN conclut que le potentiel de développement d'installations hydroélectriques est limité. Des entraves écologiques, économiques, de société et d'aménagement du territoire en sont la cause. Aux conditions actuelles, il se chiffre à 1,5 TWh/an tandis que des conditions optimisées permettraient une augmentation à 3,2 TWh/an à l'horizon 2050 (pp. 13-14).

Inconvénients

Le premier inconvénient lié à ce type d'installation mis en évidence par l'OFEN est la conscience écologique. En effet, les cours d'eau en Suisse sont déjà exploités à 90%. Continuer dans cette voie ne ferait qu'empirer la situation et pourrait s'avérer dangereux pour la biodiversité. Les cantons ne sont pas prêts à œuvrer spécialement pour le développement de l'hydraulique, soucieux de maintenir le compromis entre protection et utilisation des eaux.

Toujours selon l'OFEN, trois facteurs rendent ce type de projets difficilement rentables : les coûts de production, le prix de l'électricité et les aides publiques. Concernant ce dernier point, la RPC est souvent critiquée car tous les projets peuvent obtenir l'aide, indépendamment de leurs prix de revient. Les petits aménagements hydroélectriques présentent ainsi des coûts élevés en raison des exigences écologiques, du temps d'attente pour bénéficier de la RPC et des exigences des propriétaires fonciers. Les investissements destinés à la modification de projets existants sont également freinés, notamment en raison de la valeur résiduelle importante des installations.

Pour améliorer le système RPC, deux mesures sont envisagées :

- une puissance minimale de 300 kW afin de limiter les répercussions sur l'environnement ;
- une augmentation de la qualité des dossiers présentés en introduisant un rendement global à atteindre.

Relever les taux RPC permettrait d'augmenter la faisabilité de certains projets. Par ailleurs, encourager la rénovation d'installations supérieures à 10 MV de puissance en octroyant une aide financière permettrait d'améliorer la production tout en évitant les inconvénients environnementaux liés à de nouveaux projets. (OFEN, 2012, p. 7).

2.3.2 L'énergie éolienne

Ce type d'installations produit de l'électricité grâce à la force du vent. Lorsque l'air se déplace, il fait tourner des hélices qui, avec leur mouvement, produisent de l'énergie mécanique. Cette dernière est transformée en énergie électrique au moyen d'un générateur.

Selon l'OFEN, la Suisse compte une trentaine d'installations qui ont produit au total 85 GWh en 2012. Le plus grand site se situe dans le Jura bernois et possède seize éoliennes d'une puissance regroupée de 23,6 MV. Les plus grands parcs se trouvent dans les cantons du Valais, de Lucerne et d'Uri.

Le développement d'installations éoliennes est très règlementé. En effet, de nombreux critères sont évalués avant d'autoriser la construction d'un site : qualité du vent, accessibilité, distance des habitations et impact sur le paysage. Notons que le recours à l'énergie éolienne est soutenu par les autorités, notamment au moyen de la RPC (OFEN, 2013d).

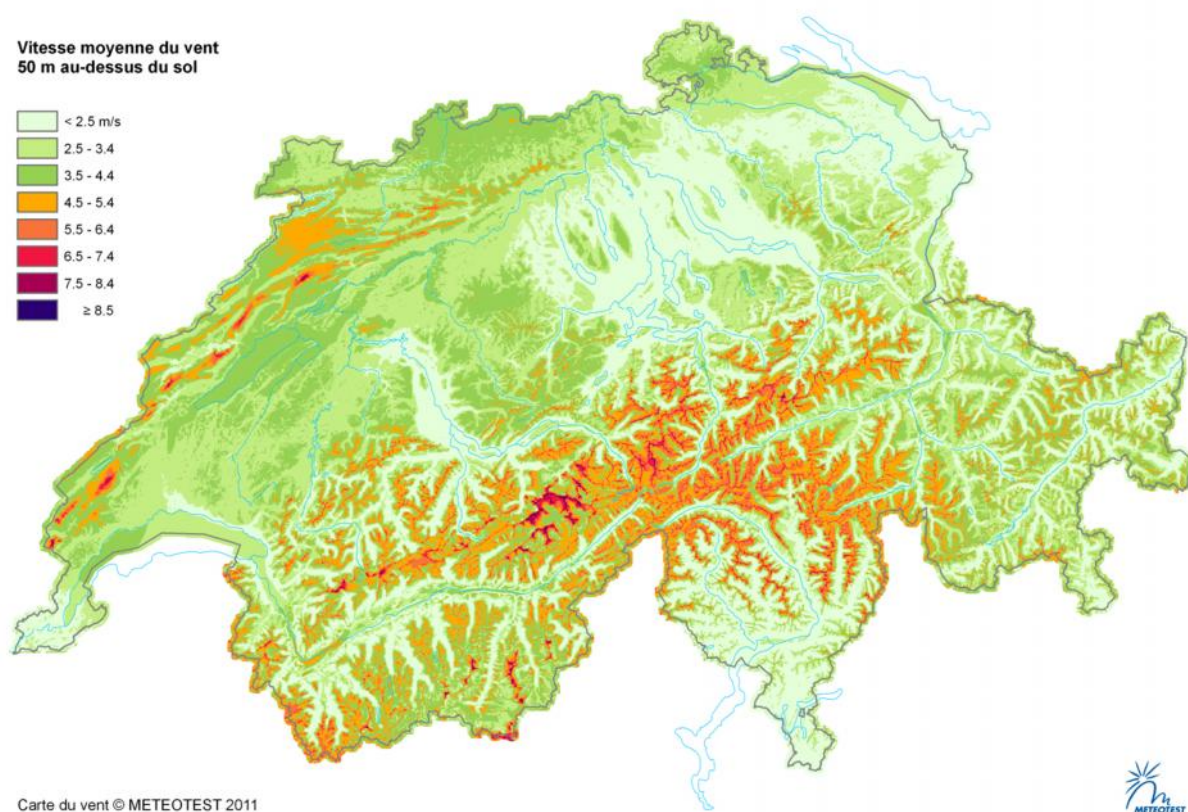
Potentiel de développement

En 2010, dans le rapport *Recommandations pour la planification d'installations éoliennes*, la Confédération avait pour objectif d'arriver à une production d'électricité d'origine éolienne de 600 GWh/an en 2030. Néanmoins, certains paramètres comme la croissance de la demande en électricité, le risque de pénurie, la sortie du nucléaire et l'échéance de contrats d'importations avec la France ont contraint nos décideurs à revoir les prévisions à la hausse. Dans l'étude *Stratégie énergétique 2050*, il est espéré que 660 GWh seront produits par des

éoliennes en 2020, 1'760 GWh en 2035 et 4'260 GWh en 2050. (Service de l'énergie et des forces hydrauliques, 2013b, p. 8)

Si le potentiel physique demeure inconnu, nous savons que certaines zones comme par exemple les emplacements urbains et les sites protégés, ne sont pas adaptées à l'implantation d'éoliennes. Il se trouve que dans certains cas, les conditions climatiques ne rendent pas possible l'utilisation de cette technologie (Service de l'énergie et des forces hydrauliques, 2013b, p. 5). La carte suivante, disponible sur le site wind-data.ch, permet de mettre en évidence les régions dans lesquelles il serait intéressant d'implanter des éoliennes.

Figure 8 : Vitesse moyenne du vent, 50 m au-dessus du sol (2011)



Source : Carte des vents de la Suisse (Meteotest, repris par wind-data.ch, 2011)

Inconvénients

Premièrement, les installations éoliennes ont un impact important sur le paysage. En effet, les plus grosses structures s'élèvent à plusieurs dizaines de mètres au-dessus du sol. Certaines personnes acceptent mal cette contrainte. Prenons l'exemple du projet voté dernièrement par les communes de Charrat et de Saxon. Un parc éolien pourrait voir le jour dans cette région mais, même si Charrat a accepté le projet, le refus de Saxon oblige son redimensionnement. D'après une récente étude mandatée par l'OFEN et réalisée par les universités de Saint-Gall et de Halle, les personnes habitant proches d'éoliennes les acceptent facilement tandis que celles vivant proche d'une zone en projet s'en méfient plus. La réticence de certains citoyens peut donc faire échouer des projets intéressants (Suisse-Eole, 2014).

Un autre inconvénient est le rendement des petites installations. Pour couvrir la consommation d'un ménage, une éolienne de 4 kW est nécessaire. Cette dernière devrait avoir un diamètre d'environ cinq mètres pour atteindre cette puissance. On imagine mal ce genre d'installations en milieu urbain. De plus, le prix de revient du kWh pour des petites éoliennes serait élevé. Le photovoltaïque est donc à privilégier pour les installations à faible puissance. (Service de l'énergie et des forces hydrauliques, 2013b, p. 2).

Pour terminer, l'énergie éolienne est dépendante de la météo et plus précisément du vent. La production d'électricité ne peut donc pas être exactement estimée et reste difficile à contrôler. Je traiterai cette problématique de manière plus détaillée dans la partie relative au stockage de l'électricité.

2.3.3 Le solaire photovoltaïque

Cette technologie a pour but d'obtenir de l'électricité à partir de la lumière émise par le soleil. Le rayonnement est d'abord transformé en courant continu puis en courant alternatif afin qu'il puisse être consommé directement ou revendu et réinjecté dans le réseau. Le rendement de cette transformation varie entre 5 et 20% en fonction de la technologie (Service de l'énergie et des forces hydrauliques, 2013c, p. 1). D'un point de vue légal, il n'y a pas besoin de permis de construire pour les installations intégrées aux toits et aux façades en Suisse (Swissolar, 2013b, p. 7).

Potentiel de développement

Le solaire photovoltaïque est une technologie à privilégier, au même titre que les autres énergies renouvelables. En effet, elle ne fait pas de bruit, n'émet pas de gaz nocifs ni de déchets et possède l'avantage, contrairement aux éoliennes, de pouvoir s'intégrer facilement et discrètement sur plusieurs types de structures. Par ailleurs, le rayonnement solaire annuel en Suisse représente en théorie 220 fois notre consommation d'énergie sur la même période, ce qui en fait une ressource quasiment illimitée (Agence des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique [AEE], 2010, p. 11).

"En Suisse, les installations de production d'électricité solaire couvrent aujourd'hui plus de 4,5 km² de surface et approvisionnent en électricité 200'000 ménages environ" (Swissolar, 2013b, p. 3). L'association suisse des professionnels de l'énergie solaire (Swissolar) fixe comme objectif que 20% de la production électrique, soit 12 TWh, soit d'origine solaire en 2025 (Swissolar, 2012a, p. 2). L'équation 2 nous démontre que, pour atteindre cet objectif, il faudrait une puissance de 1370 MW si les installations fonctionnaient en continu. En sachant que la production effective correspond à environ 1/8 de la puissance installée, il faudrait, pour produire 12 TWh par année, une puissance installée d'environ 10'960 MW. Cela représente plus de 15 fois la capacité effective fin 2013, qui se monte à 730 MW (Swissolar, 2014b, p. 1). Nous pouvons donc observer qu'une forte promotion du photovoltaïque est nécessaire pour atteindre l'objectif fixé par Swissolar.

Équation 2 : Puissance nécessaire à une production de 12 TWh/an

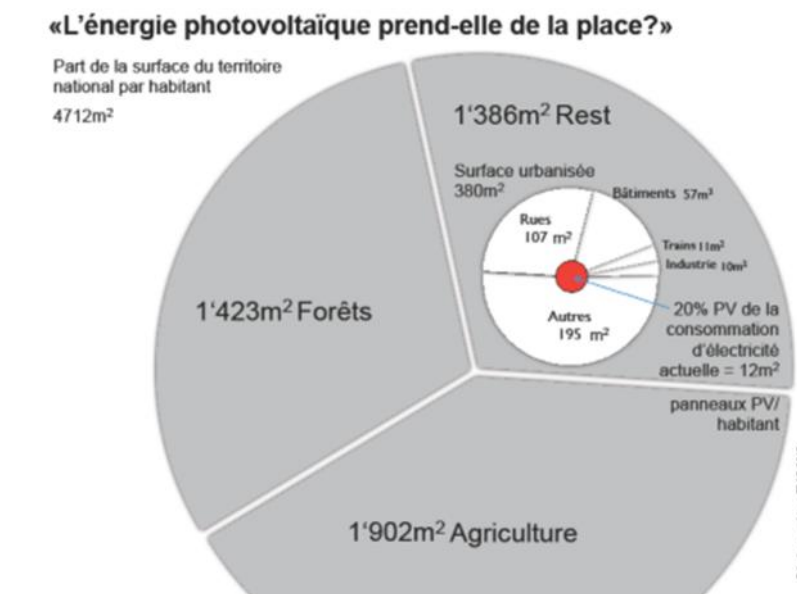
$$\begin{aligned}\text{Production: 12 TWh} \\ 12 \text{ TWh/an} &= 12 \text{ TW} \times (\text{heures/année}) \\ 12000 \text{ GWh/an} &= 12000 \text{ GW} / 8760 \\ &= 1370 \text{ MW}\end{aligned}$$

Données de l'auteur

Le graphique suivant illustre la surface du territoire suisse par habitant. Pour atteindre les 20% d'énergie électrique d'origine solaire en 2025, 12 m² de panneaux par habitant sont nécessaires. Cela signifie que la couverture d'environ 1/5 de la surface des bâtiments actuels permettrait d'atteindre cet objectif (Swissolar, 2012a, p. 2). Plus mesurée, l'OFEN estime qu'un peu plus de 20% de nos besoins actuels en électricité seront couverts par le

photovoltaïque en 2050, soit environ 13 TWh. (OFEN, 2013e). Ces chiffres permettent de constater que les installations solaires possèdent un fort potentiel de développement. En effet, en recouvrant 2/5 des bâtiments actuels de panneaux, 40% de l'énergie électrique serait d'origine solaire et remplacerait ainsi le nucléaire.

Figure 9 : Superficie nécessaire pour produire 20% d'électricité PV



Source : Comment produire 20% d'électricité solaire en 2025 (Swissolar, 2012a, p. 2)

Inconvénients

Le principal inconvénient relatif à cette technologie est lié à la production irrégulière d'électricité. En effet son rendement dépend de l'ensoleillement. Si le temps est adéquat, la production sera concentrée sur les heures les plus ensoleillées de la journée. En se basant sur cet élément, nous pouvons avancer que l'été permettra de fournir plus de courant que l'hiver. Comme avec l'électricité éolienne, il faudra stocker le surplus pour pouvoir l'allouer en fonction des besoins.

L'autre point qui peut poser problème à l'avenir est le recyclage des panneaux en fin de vie. La plupart des modules photovoltaïques installés sont garantis entre 20 et 25 ans par les producteurs. Ils ne sont pas inutilisables une fois la garantie échue. D'après plusieurs scientifiques, la durée de vie des modules est supérieure à 30 ans. Actuellement, entre 80 et 90% d'un module peut être recyclé et réutilisé pour produire de nouveaux matériaux. (Swissolar, 2013c).

Les panneaux solaires sont composés de 80 à 90% de verres selon la technologie. Les autres 10 à 20% contiennent différents métaux et du plastique, dont les semi-conducteurs représentent 0,1 à 0,2%. Jusqu'à fin 2013, il existait cinq points de collecte en Suisse qui étaient gérés par l'association européenne de recyclage des panneaux solaires (PV CYCLE). L'élimination des installations était à la charge du propriétaire (Assemblée fédérale - Parlement suisse, 2012).

Depuis le 1^{er} janvier 2014, un partenariat entre Swissolar et eRecycling offre une solution supplémentaire dans le recyclage de panneaux photovoltaïques. Cet accord permet aux membres de Swissolar de bénéficier des capacités du propriétaire du plus grand système d'élimination d'équipement électrique et électronique au monde moyennant une taxe anticipée de recyclage (TAR) (Swissolar, 2013c).

2.3.4 L'importation d'électricité

Au même titre que le développement des énergies renouvelables, l'importation d'électricité est un moyen de remplacer la production issue de l'énergie nucléaire. Au cours de ces dernières décennies, le commerce international d'énergie électrique s'est intensifié comme le montre ce tableau provenant du site de l'Office fédérale de la statistique (OFS, 2014b) :

Tableau 4 : Importation et exportation d'énergie électrique

Electricité (GWh)	1970	1980	1990	2000	2010	2011	2012
Importation	3'594	9'947	22'799	39'920	66'834	83'298	86'825
Exportation	9'619	18'128	24'907	46'990	66'314	80'711	89'025
Solde	-6'025	-8'181	-2'108	-7'070	520	2'587	-2'200

Adapté d'Exportation et importation d'énergie électrique (OFS, 2013)

Nous constatons que l'équilibre importation-exportation est relativement stable sur une année. Toutefois, il est important de prendre connaissance de deux tendances (OFEN, 2013f, p. 6786) :

- La Suisse exporte du courant la journée et en importe la nuit ;
- Elle importe également beaucoup d'électricité l'hiver et en exporte l'été.

Dans l'article "Accord sur l'électricité Suisse-UE : le temps presse, pourtant les négociations s'enlisent", la fédération romande pour l'énergie (FRE) expose les enjeux que représentent les accords sur l'électricité entre la Suisse et l'Europe.

La Suisse occupe une position importante : de par son emplacement géographique, elle fait figure de plaque tournante pour le réseau électrique européen. Il est primordial que l'accord sur l'électricité soit signé prochainement car ce dernier profiterait aux deux parties. En 2012, la Suisse a gagné 771 millions de francs grâce au solde entre exportation et importation. Avec la sortie du nucléaire, il y aura une intensification de ces échanges et certainement une augmentation des importations pour maintenir une offre comparable à celle actuellement en vigueur. En Europe, entre 10 et 20% de l'électricité européenne transite par notre pays. De plus, les installations hydroélectriques présentes en Suisse offrent des capacités de stockage nécessaires, à l'heure où des pays comme l'Allemagne ont investi massivement dans les énergies éoliennes et solaires (Fédération romande pour l'énergie, 2013).

Le commerce extérieur de l'électricité ne doit pas être négligé car il profite à la Suisse comme à l'Europe et apporterait certaines garanties comme l'intensification des échanges en cas d'offre électrique insuffisante.

2.4 Distribution et subventionnement du courant renouvelable

L'exploitation du réseau électrique suisse utilisé pour la distribution d'électricité est gérée par la Swissgrid. La société ne possède pas ses propres centrales mais achète l'électricité auprès de fournisseurs. Sa politique est d'éviter de stocker de grandes quantités de courant. L'énergie produite doit correspondre à l'énergie consommée au même moment pour garantir une exploitation du réseau à une fréquence de 50 hertz. Les fournisseurs se doivent donc d'ajuster leur production en fonction de la demande de marché. La plupart des coûts est prise en charge par les centrales électriques dont la puissance est supérieure à 50 MW. Une faible partie d'entre eux est à la charge des consommateurs (Swissgrid, 2013).

Le subventionnement de la production d'origine renouvelable, présenté dans la section suivante, est géré par cette société. Toutefois, certains cantons et communes encouragent également le développement d'installations renouvelables au moyen de différentes

incitations. Par exemple, le revenu issu des 10'000 premiers kWh produits par année est exonéré d'impôt en Valais pour les personnes physiques (Service de l'énergie et des forces hydrauliques, 2013c, p. 2).

Rétribution à prix coûtant du courant injecté

"La rétribution à prix coûtant du courant injecté (RPC) est un instrument de la Confédération servant à promouvoir la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables" (OFEN, 2013g). Son but est de garantir au propriétaire de l'installation que le prix du courant renouvelable soit égal à son coût de production. Son financement est assuré par une taxe que les consommateurs paient pour les kilowattheures qu'ils utilisent. La RPC est réservée aux technologies suivantes (OFEN, 2013g):

- la force hydraulique (jusqu'à 10 mégawatts),
- le photovoltaïque,
- l'énergie éolienne,
- la géothermie,
- la biomasse.

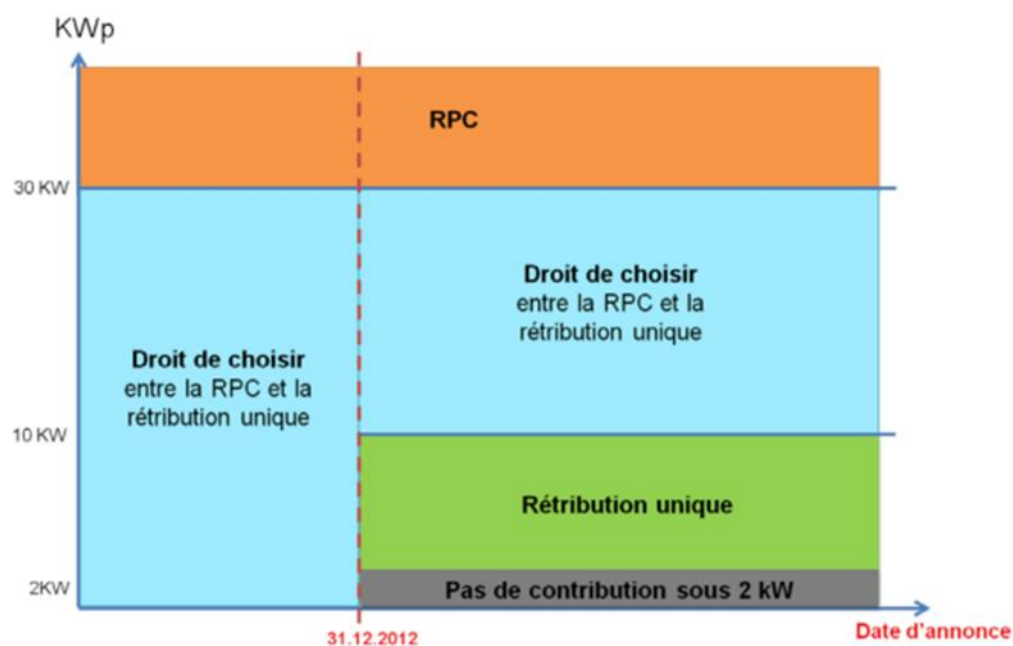
Les tarifs ne sont pas les mêmes pour toutes les technologies et varient également en fonction de la puissance installée. La rémunération se base sur un système tarifaire dégressif pour les nouvelles installations en raison des avancées technologiques planifiées et des baisses de coûts engendrées par ces dernières. La durée de rétribution va de 20 à 25 ans et varie en fonction du type de technologie (OFEN, 2013g).

Pour bénéficier de la RPC, il faut annoncer toute nouvelle installation à la société Swissgrid. Actuellement, il y a une liste d'attente qui, selon Swissolar, comportait 27'000 demandes au mois d'octobre 2013 (Swissolar, 2013a). Comme le montant de 0,6 centime par kilowattheure consommé n'était plus suffisant au financement, il se chiffrera à 1,4 centime dès le 1^{er} janvier 2014. Cette mesure est tirée de l'initiative parlementaire 12.400 qui prévoit également un allègement de la RPC pour les entreprises à forte consommation.

Le 7 mars 2014, le Conseil fédéral a adopté la révision de l'ordonnance sur l'énergie (OEne). Hormis le fait que les propriétaires d'installations raccordées au réseau peuvent désormais consommer directement l'électricité produite sur leur toit, une nouvelle mesure

devrait permettre de diminuer rapidement la liste d'attente pour la RPC. Une contribution à l'investissement unique remplacera la RPC pour les petites installations (moins de 10 kW) et les structures entre 10 kW et 30 kW pourront choisir entre la RPC et la rétribution unique. Cette rétribution unique varie entre 850 francs et 1200 francs par kW installé et ne peut pas dépasser 30% des coûts d'investissement. Le graphique ci-dessous, issu du rapport *Rétributions uniques pour les petites installations photovoltaïques* et publié par l'OFEN, illustre les différentes formes d'encouragement en fonction de la puissance de l'installation (DETEC, 2014).

Figure 10 : Système d'encouragement au PV en Suisse

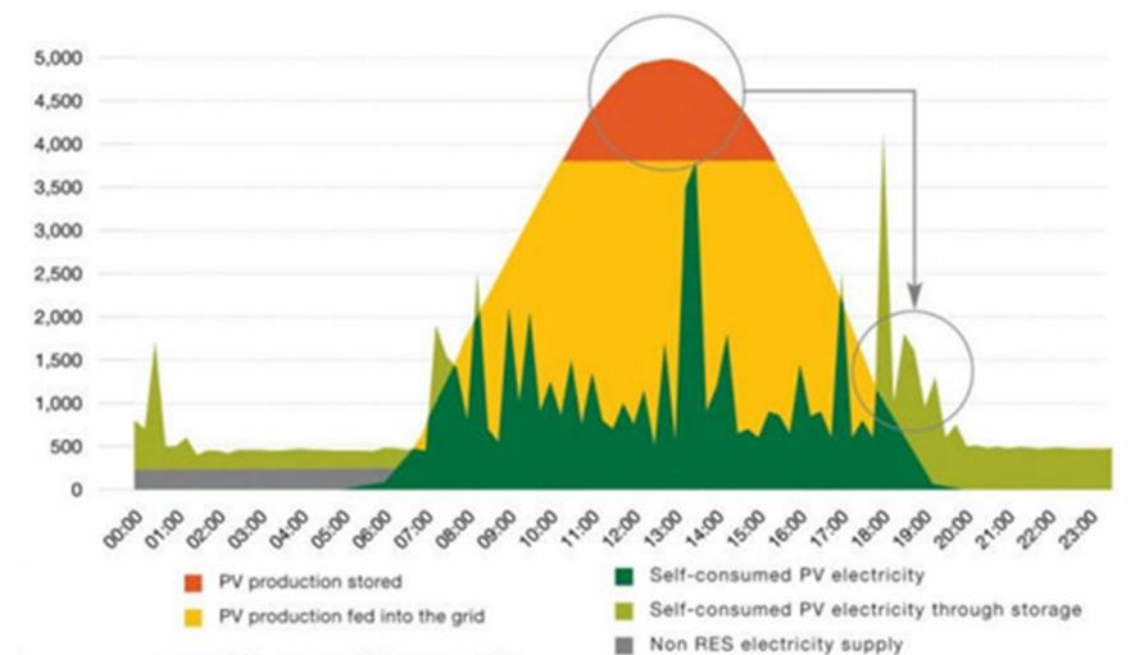


Source : Rétributions uniques pour les petites installations photovoltaïques (OFEN, 2014)

2.5 Le stockage d'électricité

Comme présenté précédemment, l'électricité issue d'installations photovoltaïques et éoliennes présente un inconvénient majeur : elle n'est pas produite en fonction de la demande et reste tributaire des conditions météorologiques. Par exemple, les panneaux solaires produisent plus lorsque l'ensoleillement est fort. Ce n'est malheureusement pas à ce moment que la demande est la plus forte. Pour faire face à ce problème, il existe deux solutions : injecter l'électricité produite dans le réseau pour en faire bénéficier des structures qui en ont besoin ou la stocker.

Figure 11 : Utilisation de l'énergie stockée produite par une installation photovoltaïque

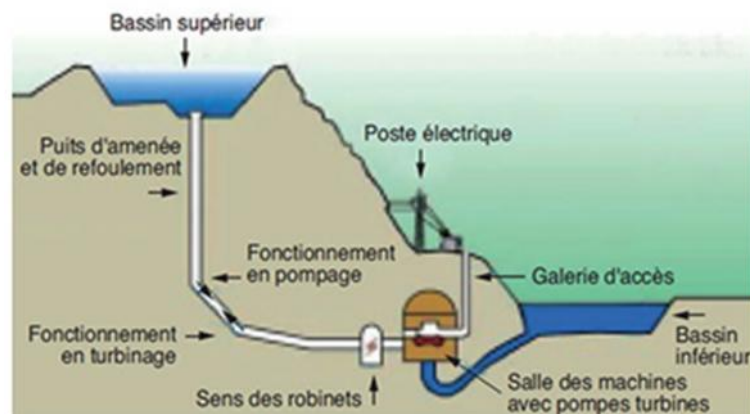


Source : Stockage de l'électricité solaire photovoltaïque (EPIA, basé sur des analyses de SMA, repris parenergiea.voila.net, 2012)

Une des formes de stockage possible est l'utilisation de batteries. Cette possibilité est bien adaptée à petite échelle et permet d'optimiser la distribution d'électricité photovoltaïque ou éolienne. Il existe plusieurs types de batteries qui peuvent répondre à ce besoin : au plomb, au lithium-ion et au sodium (IFP énergies nouvelles, 2014). Les batteries à flux présentent une solution prometteuse. Cette technologie permettant de stocker l'énergie dans des réservoirs remplis de fluides chimiques serait moins coûteuse que l'utilisation de batteries traditionnelles (enerzine, 2014).

Une autre possibilité est l'utilisation de station de transfert d'énergie par pompage-turbinage. Ce système est activable sur certaines installations hydroélectriques donc particulièrement adapté à la Suisse. De plus, il représente environ 99% des capacités de stockage massif d'énergie dans le monde avec 400 installations dont la capacité totale se monte à 125 GW. Lorsqu'il y a un surplus d'électricité, l'eau du bassin inférieur est pompée et amenée vers le bassin supérieur. En cas de besoin, le bassin supérieur est vidé. L'eau passe dans une turbine qui génère le courant électrique. L'eau est donc pompée lors de la première phase puis passe dans des turbines pour la production d'énergie électrique (IFP énergies nouvelles, 2014).

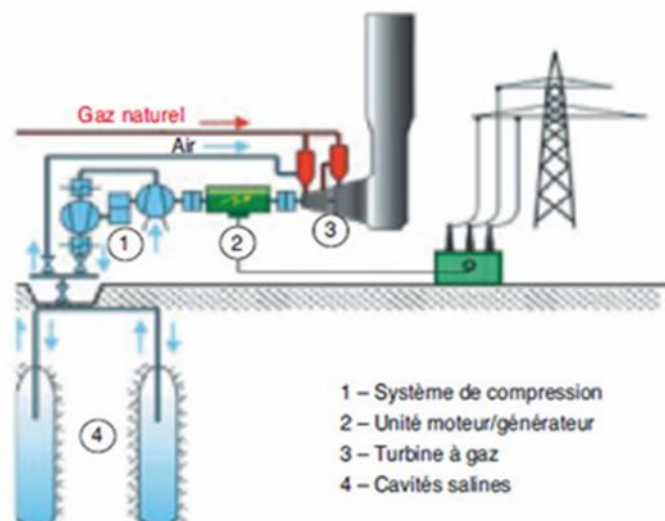
Figure 12 : Fonctionnement d'une station de pompage-turbinage



Source : Les STEP : stations de transfert d'énergie par pompage (Energeek 2011)

La dernière possibilité est le stockage par air comprimé. Le mécanisme de ce principe est, dans un premier temps, de comprimer l'air à une pression très élevée (entre 100 et 300 bar) et de le stocker dans un réservoir. Lors de la compression, l'air dégage de la chaleur qui sera utilisée pour réchauffer la turbine lors de la deuxième phase. Celle-ci consiste à détendre l'air détenu dans le réservoir dans une turbine, qui met en mouvement un alternateur. L'illustration suivante schématise le fonctionnement de l'installation d'Huntorf, en fonction depuis 1978 et dont le rendement est d'environ 50%. (IFP énergies nouvelles, 2014).

Figure 13 : Composition d'une installation de stockage par air comprimé



Source : Les technologies actuelles et leur état de maturité (KU Mohmeyer et R. Shcarf, repris par ifpenergiesnouvelles.fr, 2001)

Nous constatons que la Suisse est en pleine phase de transition énergétique. La sortie du nucléaire implique de trouver d'autres ressources afin de continuer à satisfaire la demande d'électricité. Le potentiel des énergies renouvelables existe et leur développement est encouragé par l'Etat. Néanmoins, la production irrégulière d'énergie électrique de source photovoltaïque et éolienne implique de réfléchir aux différents moyens de stockage. L'énergie hydraulique, grâce aux installations de pompage-turbinage, est une solution intéressante. D'autant plus que les installations hydroélectriques sont fortement développées en Suisse. Il faut néanmoins penser à l'augmentation des coûts liés aux transports avec l'extension des réseaux électriques mais également à ceux des installations hydroélectriques elles-mêmes. En effet, le stockage d'énergie électrique produite irrégulièrement a pour conséquence d'augmenter les coûts d'utilisation des stations de pompage-turbinage et donc d'en diminuer la rentabilité.

Après avoir examiné la situation suisse, je vais maintenant présenter celle de l'Allemagne. Cela permettra de mettre en évidence les différences entre les deux pays et de constater leur avancement respectif dans la transition énergétique.

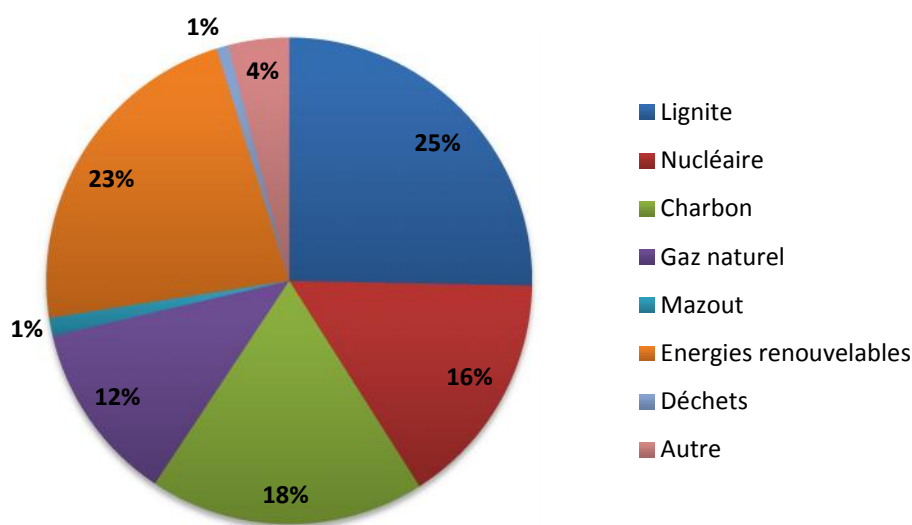
3. Situation en Allemagne

L'analyse de la situation allemande est pertinente pour cette étude car elle sert de point de comparaison pour évaluer celle de la Suisse. Cette section ne sera pas aussi détaillée que la précédente. Son but est de présenter les chiffres et les informations les plus pertinents afin de pouvoir comparer les données avec celles obtenues pour la Suisse. Elle exposera notamment la manière dont la production d'énergie électrique est répartie en Allemagne ainsi que la politique énergétique de ce pays.

3.1 Production d'électricité

En 2012, la production brute d'énergie électrique s'est montée à 629,8 TWh (AG Energiebilanzen e.V, 2014, p. 1). En annexe III, vous trouverez un tableau comportant la production détaillée par technologie. Le graphique suivant, adapté par l'auteur, se base sur une partie du tableau présenté dans le document *Stromerzeugung 1990-2013*.

Figure 14 : Production brut d'énergie électrique en Allemagne (2012)



Adapté de Stromerzeugung 1990-2013 (ag-energiebilanzen.de, 2014)

Cette figure permet de constater que l'Allemagne utilise de nombreux moyens pour produire de l'électricité. Les énergies fossiles représentent une grande part de la production. En effet, si nous additionnons les quantités provenant de l'exploitation du lignite, du charbon et du gaz naturel, nous arrivons à un total de 55%. Les énergies renouvelables représentent 23% et le nucléaire 16%.

Deux constats peuvent être tirés en observant ces données. Tout d'abord, l'Allemagne produit de l'énergie électrique en utilisant majoritairement les énergies fossiles. Même si l'exploitation de ce type de ressources peut s'avérer rentable d'un point de vue purement financier, les émissions de CO₂ et les déchets en résultant ont un impact néfaste sur l'environnement. Ensuite, les énergies renouvelables représentent 23% du mix électrique allemand. Ce chiffre montre que l'Etat a déjà réalisé une promotion importante de ce type de technologie. En effet, l'Allemagne arrive en tête des producteurs d'énergies renouvelables en Europe avec 19,6% de la production en 2010 (European Commission , 2012).

Maintenant que nous connaissons la manière dont l'Allemagne produit de l'électricité nous allons nous intéresser à sa stratégie énergétique ainsi qu'au rôle décisif que joueront les énergies renouvelables dans ce pays.

3.2 Stratégie énergétique

L'article "L'Allemagne amorce son tournant énergétique", publié sur le site des missions allemandes en France, présente les objectifs que s'est fixée l'Allemagne pour sa politique énergétique (Missions allemandes en France, 2012). Ce sont les suivants :

- Réduire au minimum de 80% l'émission des gaz à effets de serre par rapport au niveau de 1990. Les anciennes centrales à gaz et au charbon seront temporairement remplacées par de nouvelles moins polluantes ;
- S'approvisionner en énergie en utilisant majoritairement les énergies renouvelables. En 2011, 20% de l'électricité était fournie par ce type d'énergie. D'ici 2035, cette part doit se monter à 35%, puis atteindre les 80% en 2050 ;
- Améliorer l'efficacité énergétique et faire diminuer la consommation de manière importante. La rénovation d'anciens bâtiments permettra de réduire les pertes d'énergie liées au chauffage. Les politiques allemands visent une amélioration de l'efficacité énergétique de 2% par année.

À ces trois objectifs peut s'ajouter la sortie du nucléaire. Déjà prévue initialement par le programme "Energiewende", des mesures ont été prises pour accélérer le processus. En effet, d'après l'article "L'Allemagne officialise sa sortie du nucléaire", paru sur le site du

journal *le Monde*, la coalition gouvernementale a annoncé en 2011 que 17 des 20 réacteurs nucléaires seront mis hors service pour la fin de l'année 2021. Les trois derniers actifs connaîtront le même sort une année plus tard (Le Monde, 2011).

3.3 Les énergies renouvelables

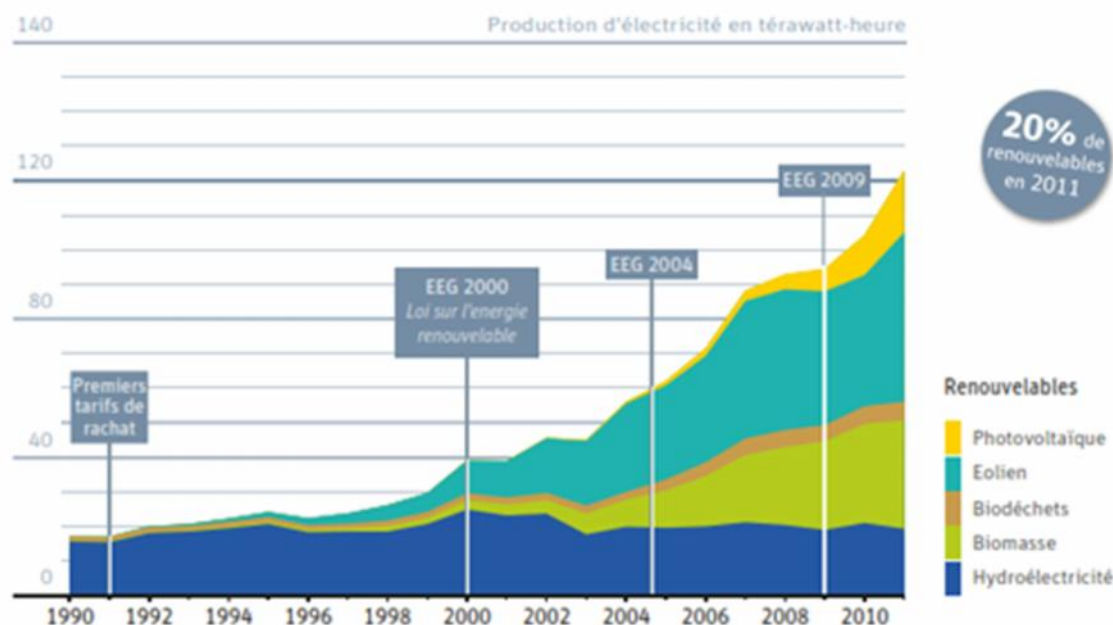
L'Allemagne a déjà beaucoup misé sur les énergies renouvelables par le passé, au point d'être le pays ayant le plus investi dans ces technologies au niveau mondial en 2010 (European Commission , 2012). De plus, elle envisage de continuer à développer l'utilisation de ce type de production, en témoigne l'objectif de 80% de production d'énergie électrique de source renouvelable en 2050 (Missions allemandes en France, 2012). Cette partie présentera la situation actuelle et le potentiel de développement pour les énergies hydrauliques, solaires et photovoltaïques ainsi qu'un bref aperçu des lois et mesures politiques influençant le développement des énergies renouvelables.

3.3.1 Erneuerbare-Energien-Gesetz

Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) est un ensemble de mesures dont le but est de promouvoir et de favoriser l'utilisation d'énergies renouvelables. Cette loi est en quelque sorte l'équivalent de la RPC en Suisse. Les installations de type éoliennes, solaires photovoltaïques, géothermiques, hydrauliques et biomasses reçoivent une subvention pour chaque kilowattheure produit pour une durée de 20 ans. Cette contribution de l'Etat permet aux propriétaires d'amortir ce type d'investissement. De plus, l'énergie électrique issue d'installations renouvelables est injectée et distribuée en priorité dans le réseau (Bundesverband WindEnergie, 2014).

L'EEG est entrée en vigueur en 2000 et fut révisée plusieurs fois afin de s'adapter aux objectifs fixés par la politique énergétique de l'Allemagne. Elle vient supporter les mesures déjà existantes comme la promotion d'énergie électrique renouvelable qui se fait depuis 1991. Le graphique suivant, issu du rapport *la Transition énergétique – l'Energiewende allemande* (Morris & Pehnt, 2012, p. 37), illustre l'augmentation de la production d'énergie électrique de source renouvelable entre 1990 et 2011.

Figure 15 : Énergie électrique renouvelable produite en Allemagne entre 1990 et 2011



Source : The German Energiewende (BMU, repris par Morris & Pehnt, 2012, p.37)

Grâce à cette loi, l'énergie électrique d'origine renouvelable a presque quadruplé entre 2000 et 2012. Cela a des effets positifs sur l'émission de gaz à effets de serre, dont la réduction imputable à l'utilisation d'énergies renouvelables s'est montée à 146 millions de tonnes en 2012. Par ailleurs, l'industrie des énergies renouvelables est un secteur dynamique qui a employé, en 2012, plus de 380'000 personnes. Les entreprises y travaillant ont développé une expertise dans les différentes branches qui renforce encore l'utilisation de ce type de moyen de production (Bundesverband WindEnergie, 2014).

Jusqu'à présent, les effets imputables à l'EEG sont très encourageants. Il reste néanmoins un point pouvant poser problème : les gros consommateurs d'énergie électrique sont exonérés des prélèvements effectués sur la consommation servant à financer le subventionnement d'installations renouvelables. Si la demande pour ce type de moyens de production continue à croître de manière importante, l'Allemagne risque de devoir faire face à une situation préoccupante. Elle devra trouver d'autres sources pour financer les subventions et pouvoir continuer à encourager la production d'énergie électrique de sources renouvelables (Bundesverband WindEnergie, 2014).

Je vais maintenant illustrer l'importance croissante des énergies renouvelables avec une présentation des capacités actuelles des installations photovoltaïques, éoliennes et hydroélectriques.

3.3.2 L'énergie éolienne

Début 2012, environ 8% de l'énergie électrique produite en Allemagne est d'origine éolienne. Nous pouvons diviser ce total en deux catégories : l'éolien terrestre et l'éolien offshore, qui représentent respectivement 7,8 et 0,2% de l'électricité produite en Allemagne. L'éolien terrestre est favorisé par les petites et moyennes entreprises ainsi que par les municipalités tandis que l'éolien offshore intéresse surtout les grandes entreprises.

Les premières installations éoliennes terrestres, qui datent du début des années 1990, arrivent en fin de vie et doivent être remplacées. De plus, la technologie actuelle permet de produire en moyenne dix fois plus que celle du milieu des années 1990. L'Allemagne a donc l'occasion de renforcer la capacité de ses installations les plus anciennes, d'autant plus que l'éolien terrestre est beaucoup moins cher que l'éolien offshore.

Concernant l'éolien offshore, le gouvernement a pour projet de produire 10 gigawatts d'ici 2020 et 25 gigawatts d'ici 2030. L'avantage de ce moyen de production est sa fiabilité. En effet, le courant maritime est plus constant. La production d'énergie électrique demeure donc plus régulière, offrant ainsi un meilleur contrôle pour la distribution. (Morris & Pehnt, 2012, pp. 17-18).

3.3.3 L'énergie solaire photovoltaïque

En 2012, l'Allemagne a produit 26,4 TWh d'énergie électrique au moyen d'installations photovoltaïques, soit un peu plus de 4% de son mix électrique (AG Energiebilanzen e.V, 2014). Elle reste le leader mondial sur le plan de la capacité installée avec 32,411 MW, soit plus de 30% du total mondial (European photovoltaic industry association [EPIA], 2013, p. 32). Pour illustrer ce que représente ce chiffre, il est intéressant de le mettre en relation avec la consommation. Ainsi, l'Allemagne a la possibilité de satisfaire près de 50% de sa demande énergétique pendant quelques heures un jour d'été ensoleillé si elle utilise l'ensemble de ses installations. (Morris & Pehnt, 2012, p. 21). En annexe IV, vous trouverez un tableau contenant certains chiffres illustrant la situation photovoltaïque en 2013.

Dans son rapport *Global Market Outlook for Photovoltaics 2013-2017* (2013, p.27), l'European Photovoltaic Industry Association (EPIA) s'est basée sur un scénario de croissance importante en raison du peu de barrières politiques et juridiques ainsi que des avantages financiers liés à cette technologie. Ainsi, elle estime que la capacité totale installée en 2020 sera d'environ 80'000 MW. L'avenir nous dira si ces prévisions se vérifieront. Ce qui est certain, c'est que le photovoltaïque a un rôle prépondérant à jouer dans le mix électrique allemand, dont le but est, rappelons-le, de produire 80% d'énergie électrique de source renouvelable dès 2050.

3.3.4 L'énergie hydraulique

La production d'énergie électrique issue d'installations hydroélectriques s'est montée à 21,8 TWh pour l'année 2012 (AG Energiebilanzen e.V, 2014, p. 1). C'est la technologie renouvelable la moins utilisée en Allemagne, qui favorise l'éolien, le solaire photovoltaïque et la biomasse. Elle n'en demeure cependant pas moins importante. Disposant d'un coût de production plus faible que la plupart des autres énergies (0,02 €/kWh), ce type d'installation joue un rôle essentiel de stabilisateur de réseau. En effet, la production d'énergie électrique de sources photovoltaïques et éoliennes est tributaire des conditions météorologiques. Grâce à leur capacité de stockage, les stations de pompage-turbinage permettent de réguler l'approvisionnement en fonction de la demande (Deutsche Energie-Agentur [DENA], 2013).

L'Allemagne encourage la modernisation des installations existantes afin d'optimiser leur rendement. Elle soutient également le développement de nouvelles centrales en rachetant l'énergie produite aux prix fixés par la loi sur les énergies renouvelables. (DENA, 2013a). L'Agence allemande de l'énergie (DENA) voit dans l'hydroélectricité de petite capacité, couplée à une autre énergie renouvelable, un moyen idéal pour gérer l'approvisionnement et la consommation de régions reculées. L'énergie d'origine maritime est encore peu utilisée mais pourrait également présenter une solution intéressante pour les régions côtières en cas de baisse des coûts et de développement de cette technologie (DENA, 2013b).

Après avoir décrit la situation des technologies renouvelables, nous allons nous intéresser à la distribution d'électricité. Nous constaterons que favoriser les énergies éoliennes et photovoltaïques nécessitent des ajustements au niveau du réseau et rendent la production moins prévisible.

3.4 Réseau et distribution

Le réseau électrique allemand est divisé en quatre opérateurs et plus de 800 gestionnaires de réseaux de distribution. Le développement optimal des énergies renouvelables nécessite une extension estimée à 2'250 kilomètres de nouvelles lignes par les partisans du renouvelable (Morris & Pehnt, 2012, pp. 24-25). Le tableau suivant présente la composition du réseau électrique allemand à la fin de l'année 2012.

Tableau 5 : Composition du réseau électrique allemand fin 2012

Types de lignes	Nombre de kilomètres	Utilisation
Haute tension (60 à 110 kV)	80'000	Grosses industries
Moyenne tension (6 à 30 kV)	500'000	Installations de grande taille (ex. Hôpitaux)
Basse tension (230 et 400 V)	1'100'000	Ménages et PME
Transport (220 et 380 kV)	35'000	-

Adapté de The German Energiewende (Morris & Pehnt, 2012, p.26)

La mission principale du réseau électrique est de fournir à tout moment une quantité d'énergie correspondant à la demande. Recourir aux énergies éoliennes et photovoltaïques complique cette tâche car ces technologies ne produisent pas d'électricité de manière régulière. Il est donc nécessaire de stocker l'excédent. Plusieurs moyens existent : utilisation de stations de pompage-turbinage, air comprimé dans des cavernes et batteries. Une autre solution envisageable est le stockage sous forme de gaz qui peut être utilisé comme carburant ou pour la production d'énergie flexible. Par ailleurs, l'Allemagne pourrait exporter le surplus d'énergie vers la Norvège et la Suisse. Ces deux pays ont développé de manière importante l'énergie hydraulique et possèdent de grosses capacités de stockage. Néanmoins, les réseaux électriques ne sont pas assez évolués pour assurer le transport d'énergie. D'un point de vue politique et économique, recourir à cette technique rendrait l'Allemagne dépendante (Morris & Pehnt, 2012, p. 25).

Gestion de la transition énergétique

Depuis plusieurs années déjà, l'Allemagne favorise les énergies renouvelables. L'utilisation de ce type de technologies nécessite l'adaptation du réseau de transport et de distribution. À l'heure actuelle, le nord de l'Allemagne produit beaucoup d'énergie éolienne tandis que le sud recourt plus à la technologie photovoltaïque. En se basant sur deux de ses études, l'Agence allemande de l'énergie conclut que, pour atteindre l'objectif de 51 GW de capacité éolienne installée en 2020, 4'500 kilomètres de lignes à très haute tension supplémentaires sont nécessaires (Morris & Pehnt, 2012, pp. 26,27).

Ces résultats sont néanmoins contestés car les données sous-jacentes n'ont pas été publiées. Pour atteindre l'objectif de 2020, la moitié des estimations de la DENA serait suffisant. Par ailleurs, favoriser l'éolien terrestre plutôt que le offshore permettrait de se passer d'une telle extension du réseau actuelle. De plus, les récents progrès technologiques réduisent le nombre de lignes électriques nécessaires.

Concernant l'énergie solaire, certains acteurs de l'industrie ont proposé d'ajuster les tarifs de rachat en fonction des régions. Cela permettra d'encourager les installations de panneaux photovoltaïques dans le nord du pays et ainsi faciliter l'intégration au réseau.

Malheureusement, l'extension du réseau s'avère difficile. Sur les 1'900 kilomètres de lignes qui doivent être urgemment construites, 200 ont été réalisées. Les problèmes sont en partie dus aux oppositions locales et à la longueur des procédures administratives. Néanmoins, les énergies renouvelables peuvent permettre d'optimiser le transport d'énergie électrique. Par exemple, les centrales solaires peuvent être utilisées afin de stabiliser le réseau. Concernant l'énergie éolienne, toute nouvelle installation doit mettre en place une ligne de réserve capable de remplacer la principale en cas de problème (Morris & Pehnt, 2012, p. 27).

L'Allemagne est en pleine transition énergétique. La catastrophe de Fukushima a accéléré la sortie du nucléaire. Les énergies renouvelables, quant à elles, sont déjà bien développées et produisent 23% du mix électrique allemand (AG Energiebilanzen e.V, 2014). L'Etat souhaite continuer à développer ce type de ressources pour atteindre les 80% d'énergie électrique de source renouvelable. Néanmoins, la problématique liée au stockage d'énergie est très

présente. En effet, l'Allemagne possède peu d'installations hydroélectriques et doit, par conséquent, trouver d'autres moyens de stockage comme l'utilisation de batteries. Une solution serait de signer des accords avec des pays comme l'Autriche, la Suisse et la Norvège et d'utiliser leurs installations hydroélectriques pour stocker le surplus d'énergie.

Nous possédons maintenant assez d'éléments pour comparer directement la situation de l'Allemagne et celle de la Suisse. Les allemands ont commencé leur transition énergétique plus tôt, s'appuient davantage sur les énergies éoliennes et photovoltaïques et dépendent moins de l'énergie nucléaire. Néanmoins, ce pays rencontre des difficultés au niveau du réseau et du stockage d'électricité.

La Suisse exploite de manière importante les installations hydroélectriques. En plus de produire de l'électricité renouvelable, les stations de pompage-turbinage permettent de stocker le surplus découlant des productions éoliennes et photovoltaïques. Ce pays a donc la capacité de supporter le développement de ces deux technologies qui permettraient de compenser la sortie du nucléaire.

Même si l'Allemagne recourt proportionnellement plus à aux énergies éoliennes et photovoltaïques que la Suisse actuellement, cette dernière possède l'avantage d'avoir de meilleures possibilités de stockage. Dans la section suivante, je présenterai l'évolution des coûts du photovoltaïque et calculerai la rentabilité d'installations de plusieurs tailles en Suisse.

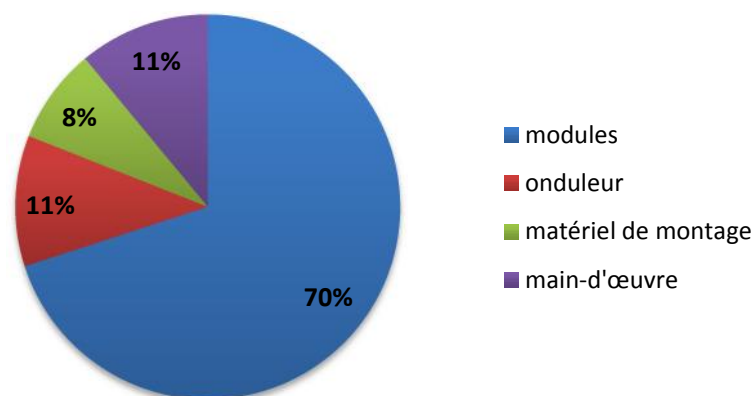
4. Calcul des coûts

Les parties précédentes ont présenté les situations suisse et allemande d'un point de vue énergétique, et plus particulièrement au niveau de la production d'énergie électrique. Les différents éléments ont permis de constater que les deux pays se doivent de continuer à développer les énergies renouvelables afin de remplacer l'énergie électrique que fournissent actuellement les centrales nucléaires. Dans cette section, le but est de considérer les installations photovoltaïques d'un point de vue financier. Le premier sous-chapitre présentera une évolution générale du prix de la technologie. Par la suite, des calculs de coûts seront effectués pour différentes installations en Suisse. La dernière partie se limitera à l'évolution des prix en Allemagne. Par ailleurs, un fichier Excel permettant de calculer automatiquement, après insertion de quelques variables clés, le coût et la rentabilité des installations en Suisse est disponible en annexe de ce travail.

4.1 Coût d'une installation solaire photovoltaïque

Une installation solaire photovoltaïque est composée de plusieurs éléments : des modules, un onduleur et éventuellement une batterie pour le stockage. Lorsque l'on veut connaître le prix de l'ensemble de l'installation, il faut rajouter le coût de la main d'œuvre et du matériel de montage. Auparavant, une grande partie du prix était absorbée par les modules, comme l'illustre le graphique suivant :

Figure 16 : Composition du prix d'une installation photovoltaïque en 2006



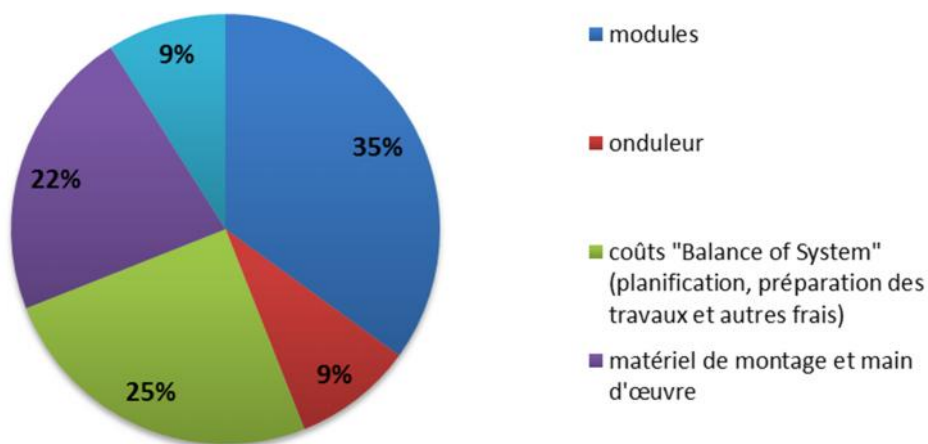
Adapté de from KW to kWh (Stefan Novak, 2014)

Ces dernières années, les prix ont fortement baissé. Cela peut s'expliquer par une hausse de la demande au niveau mondial. Un graphique illustrant l'évolution de la capacité installée chaque année au niveau mondial est disponible en annexe V. Ce mouvement est imputable, en partie, aux politiques de nombreux pays qui souhaitent favoriser la production d'énergie électrique de source renouvelable.

Il est surtout dû à l'inondation du marché par les entreprises chinoises. La commission européenne a d'ailleurs décidé de taxer les panneaux provenant de ce pays à un taux moyen de 47,6% dès le 6 août 2013 en fonction du prix de vente dans le pays d'origine. Cette action a pour but d'aider les producteurs européens qui souffrent de la concurrence des entreprises asiatiques. En effet, les panneaux issus de cette région étaient vendus à un prix inférieur de 88% à ceux des producteurs européens. Avec une part du marché européen proche de 80% et des capacités de production équivalentes à 150% de la consommation mondiale, la Chine exerce une forme de dumping. Cette domination menace les 25'000 emplois que représentent l'industrie solaire photovoltaïque en Europe. (Commission européenne, 2013).

La structure du coût d'une installation a également évolué. Les modules ne sont plus aussi chers et pèsent moins sur le prix total facturé au client. Le graphique ci-dessous illustre la situation à l'heure actuelle. Il est intéressant de relever que les modules n'absorbent plus que 35% du prix total contre environ 70% en 2006.

Figure 17 : Composition du prix d'une installation photovoltaïque en 2014



Adapté de PV Status Report (European Commission, 2013, p.28)

4.2 Suisse

La Suisse exerce une politique énergétique encourageante pour les énergies renouvelables. Hormis la RPC et la rétribution unique, plusieurs autres moyens sont utilisés pour favoriser le développement d'installations photovoltaïques. Par exemple, certains cantons offrent des subventions. En Valais, les 10'000 premiers kilowattheures produits annuellement sont exonérés d'impôts. Cela a pour conséquence d'améliorer d'approximativement 1% le rendement financier d'installations produisant moins de 10'000 kWh/an. Des subventions peuvent également être obtenues en fonction de la commune où le projet est construit (Service de l'énergie et des forces hydrauliques, 2012).

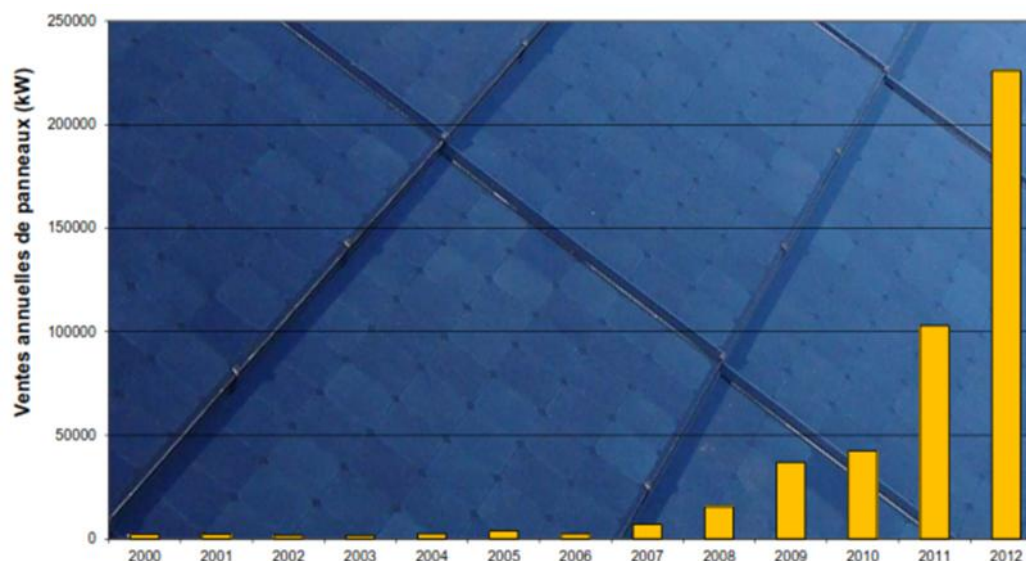
Par ailleurs, des banques octroient des crédits à des tarifs préférentiels pour encourager ce type d'investissement. Par exemple, la Banque Coop offre des réductions de taux d'intérêt variant de 0,1 à 0,5%. Cela permet donc aux personnes intéressées de contracter des prêts plus avantageux et d'obtenir les liquidités nécessaires à la réalisation de leur projet (Swissolar, 2014c).

Après cet aperçu des incitations en faveurs des énergies renouvelables, je vais présenter l'évolution des prix en Suisse.

4.2.1 Evolution des prix

L'exploitation des énergies renouvelables demeure assez récente, comme l'illustre la figure n° 5 en page 11. Le manque d'intérêt pour ce type de ressources peut s'expliquer par deux phénomènes qui sont souvent liés : le manque de connaissances au niveau technologique et les coûts trop élevés. La situation a néanmoins changé ces dernières années. La demande a fortement augmenté comme l'illustre le graphique ci-dessous.

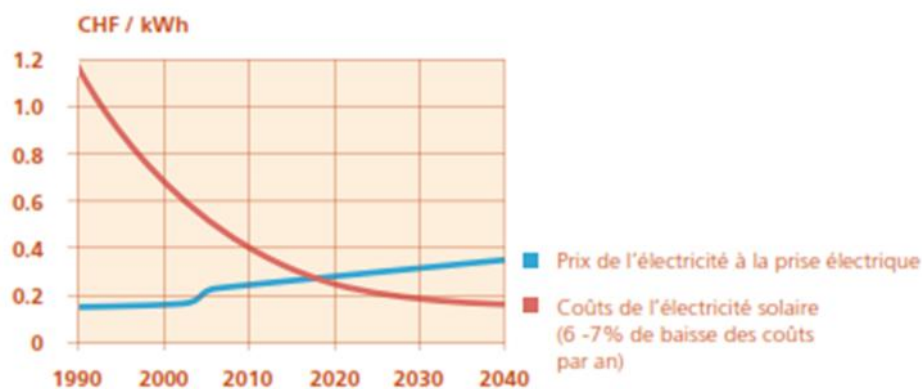
Figure 18 : Marché du photovoltaïque en Suisse



Source : *Marché du photovoltaïque en Suisse* (Swissolar, 2013d)

Cette tendance devrait se poursuivre dans les années à venir. Pour illustration, alors que la Confédération prévoyait que 50 MW seraient installés en 2013, c'est au final 300 MW qui sont venus augmenter le parc photovoltaïque suisse (La Télé, 2013). Par ailleurs, la hausse des quantités vendues permet aux producteurs de baisser leurs prix d'environ 6% chaque année. Ainsi, le prix d'une installation de puissance inférieure à 10kW varie entre 3000 et 4000 francs par kWc, soit 850 à 1000 francs le m². Le prix de revient du kWh se situe entre 20 et 25 centimes pour les grandes installations et entre 25 et 35 centimes pour les petites (Swissolar, 2013b, p. 9). Le graphique ci-dessous illustre l'évolution du prix de l'électricité solaire en parallèle de celle du prix de l'énergie électrique issue de l'ensemble du mix énergétique. Si les prévisions se confirment, la parité réseau devrait être atteinte entre 2016 et 2018.

Figure 19 : Évolution du prix de l'énergie électrique solaire en Suisse



Source : *L'électricité solaire, une énergie inépuisable* (Swissolar, 2013b, p.9)

La réduction des coûts de l'énergie photovoltaïque augmente la rentabilité de cette technologie. Par la suite, je procéderai aux calculs permettant de définir la rentabilité d'installations photovoltaïques de différentes tailles. Je commencerai par présenter la méthodologie utilisée ainsi que les indicateurs financiers retenus. L'ensemble du processus de calcul pour une installation de 3 kWc sera également détaillé. Finalement, un tableau contenant un condensé des résultats (dont le contenu exhaustif est disponible en annexe VI) obtenus sera commenté afin de résumer la situation.

4.2.2 Méthodologie

Notre objectif est de savoir combien coûte une installation photovoltaïque et quel est son rendement. Il est malheureusement difficile de répondre à ces questions de manière exhaustive car chaque installation est unique : emplacement, orientation, puissance installée, matériaux utilisés,... Pour ce faire, plusieurs cas jugés représentatifs seront utilisés. Ils se différencieront au niveau de la puissance. En effet, cette dernière dépend du nombre de modules. Par conséquent, plus l'installation est grande, plus elle est puissante (à condition que la même technologie soit utilisée). Le but est de savoir si des infrastructures d'une certaine taille sont plus rentables que les autres.

Un fichier Excel, disponible en annexe, sera utilisé pour calculer le rendement des différentes installations dans ce travail. Ce document, réalisé par l'auteur, s'est inspiré de celui créé par le département de l'Énergie et des forces hydrauliques valaisan (l'URL du fichier figure dans l'onglet *Source* du document Excel ci-joint). Il calcule automatiquement plusieurs indicateurs financiers en fonctions des paramètres insérés par l'utilisateur. Dans ce dossier, plusieurs cas seront présentés. Les calculs de coûts et de rentabilité seront effectués pour six installations de puissance différentes :

- 3 kWc (rétribution unique)
- 12 kWc (rétribution unique)
- 12 kWc (RPC)
- 29 kWc (rétribution unique)
- 29 kWc (RCP)
- 1 MWc (RPC)

Ce choix est basé sur les modifications apportées à l'ordonnance sur l'énergie (OEne) en mars 2014. En effet, la rétribution unique est un nouveau moyen d'encourager le développement d'installations de faible puissance. Désormais, une seule subvention, qui peut représenter au maximum 30% des coûts d'investissement, est versée au propriétaire d'installations de petite taille. Il est effectué rapidement, dans la mesure des fonds disponibles, et remplace ainsi la RPC. (OFEN, 2014a).

Il est important de savoir que le droit à la rétribution unique est établi dès que Swissgrid obtient l'avis de mise en service de l'installation. Actuellement, la subvention est versée au plus tôt 20 mois après que l'annonce ait été faite à Swissgrid (Swissgrid, 2014).

Par ailleurs, les variables influençant la performance du système comme l'inclinaison des panneaux seront paramétrées selon les valeurs optimales proposées par l'outil gratuit PVGIS. Les données financières comme les coûts des installations ou les taux d'intérêt des prêts seront calculés en utilisant des valeurs moyennes. Bien entendu, le fichier Excel fournit en annexe est construit de manière à permettre la modification de certains paramètres pour pouvoir analyser les coûts et le rendement d'une installation précise.

4.2.3 Indicateurs financiers

Il existe plusieurs indicateurs financiers qui permettent de voir si un investissement est rentable ou s'il faut favoriser un projet plutôt qu'un autre. On distingue généralement deux manières de procéder : la méthode de calcul statique ou la méthode dynamique.

La première est basée sur la valeur moyenne, comme par exemple le bénéfice réalisé la première année. Dans notre cas, la méthode dynamique est mieux adaptée car elle considère toute la durée d'utilisation de l'installation. L'évolution des cash-flows³ est donc prise en compte et les résultats obtenus représenteront mieux la réalité. Deux indicateurs de la méthode dynamique seront par conséquent retenus pour ce travail. Il s'agit du taux de rentabilité interne (TRI) et de la valeur actuelle nette (VAN) (Leimgruber & Prochinig, 2009, pp. 129,137).

³ Dans notre cas, le mot cash -flow définit les flux de monnaies relatifs à la vente d'énergie électrique produite par l'installation (adapté du site internet investopedia.com).

Valeur actuelle nette

Le calcul de la VAN oppose les cash-flows actualisés à la date de mise en service de l'installation au capital investi. Dans le cas où les cash-flows sont inférieurs au capital investi, la VAN est négative. Il n'est donc pas intéressant de procéder à l'investissement car il faut déboursier plus d'argent que ce que nous en gagnons. La VAN est fortement influencée par le taux d'intérêt utilisé pour l'actualisation. En effet, il se peut qu'une VAN soit négative à un taux de 10% mais positive à 8%. Lors de comparaisons entre deux investissements, on favorisera celui présentant la VAN la plus élevée (Leimgruber & Prochinig, 2009, p. 143). La valeur actuelle nette est définie par la formule suivante :

Équation 3 : Valeur actuelle nette

$$\text{Valeur Actuelle Nette (VAN)} = \sum_{t=1}^N \frac{\text{Cash flow}_t}{(1 + \text{taux})^t} - I$$

Source : la Valeur Actuelle Nette d'un actif : comment la calculer ? (financedemarche.fr, 2014)

N	durée d'utilisation
Cash-flow_t	excédent de recette à l'année t
taux	taux d'intérêt en pourcent
Indice t	nombre d'années de 1 à N
I	capital investi initialement

La VAN peut être calculée rapidement avec Excel en insérant la fonction : VAN(taux d'intérêt ;plage de données avec l'ensemble des cash-flows)-investissement initial.

Afin de mieux comprendre cette formule, prenons l'exemple d'une machine coûtant 6'000 CHF dont la durée d'utilisation est de 10 ans et qui génère des cash-flows de 900 CHF chaque année. Son financement est possible grâce un prêt à 3% couvrant l'intégralité de l'investissement réalisé au début de la première année. Quelle est la VAN?

Dans Excel, nous insérons :

$$=\text{VAN}(3\% ; \text{plage contenant 10 cash-flows de 900}) - 6000 = 1677,18$$

Taux de rendement interne

Le TRI est lié au calcul de la valeur actuelle nette. Il représente le taux d'intérêt auquel la somme des cash-flows actualisés est égale au capital investi. Autrement exprimé, c'est le taux d'actualisation pour lequel la VAN sera égale à zéro. Un investissement est rentable si le TRI est supérieur au taux d'intérêt exigé par les actionnaires et les créanciers (Leimgruber & Prochinig, 2009, pp. 150,151). Trois étapes sont nécessaires afin de trouver le taux de rentabilité interne :

1. Déterminer le cash-flow moyen.
2. Déterminer le taux d'intérêt approximatif.
3. Corriger le taux d'intérêt approximatif.

Avec Excel, il suffit d'utiliser la formule TRI(plage contenant les cash-flows)

Pour illustrer ces éléments, reprenons les chiffres utilisés pour l'exemple de calcul de la VAN. Pour trouver le TRI, il suffit d'insérer dans Excel :

=TRI(plage contenant un premier cash-flow de -6000 et 10 autres de 900)=8,14%

Autres indicateurs utilisés

D'autres indicateurs financiers seront utilisés dans ce dossier pour juger de l'intérêt à investir dans une installation photovoltaïque. Parmi eux, le coût moyen pondéré du capital mérite d'être plus amplement détaillé.

Le *Weighted average cost of capital* (WAAC) ou coût moyen pondéré du capital (CMPC) en français, permet de connaître le coût annuel moyen du financement d'un projet ou d'une entreprise. Il représente, pour les créanciers et les investisseurs, la rentabilité moyenne par année attendue en retour du montant qu'ils ont investi (actufinance, 2014). Dans ce document, le WAAC sera utilisé comme taux d'actualisation pour le calcul de la VAN.

Équation 4 : Coût moyen pondéré du capital

$$WAAC = (\%D \times t_d)(1 - t_i) + (\%FP \times t_r)$$

Adapté de Coût moyen pondéré du capital (actufinance, 2014)

%D	dettes en pourcentage du montant investi
%FP	fonds propres en pourcentage du montant investi
t_d	taux d'intérêt de la dette
t_i	taux d'imposition
t_r	taux de rendement exigé par les créanciers

Les autres indicateurs utilisés dans ce dossier sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 6: Autres indicateurs utilisés

Désignation	Définition
Breakeven (seuil de rentabilité)	Temps nécessaire pour que les cash-flows générés aient remboursé les fonds propres et la dette utilisée pour le financement du projet.
Durée de remboursement de la dette	Temps pendant lequel les cash-flows générés par l'investissement servent à rembourser la dette.
Rendement annualisé du projet	Taux permettant de savoir ce que rapporte ou coûte l'investissement par année. Il est solution de l'actualisation sur une année de l'investissement initial divisé par le total des cash-flows.
Prix de revient du kWh	Combien coûte en moyenne le kWh d'énergie électrique produit par l'installation. Il met en relation le coût total de l'installation (investissement et frais d'entretien diminué de l'effet fiscale) avec la production réalisée sur l'ensemble de la durée de vie.
Rendement annuel des capitaux propres	Taux indiquant combien rapportent annuellement les capitaux propres utilisés lors de l'investissement.
Recettes sur x années	Somme des cash-flows positifs générés par la production sur une période de x années.
Bénéfice sur x années	Somme des cash-flows positifs générés par la production, déduction des charges effectuée, sur une période de x années.
Economie d'impôt globale	Somme entre le montant économisé grâce aux nombres de kWh produits exonérés et les gains d'impôts provenant de la déduction de l'investissement dans la déclaration fiscale.

Données de l'auteur

4.2.4 Cas de base : installation de 3 kWc subventionnée

Le choix de la dimension d'une installation photovoltaïque se fait généralement sur la base de trois critères : la consommation d'énergie électrique, la surface à disposition et le budget (Energie facteur 4, 2014). Dans notre cas, nous nous baserons sur la puissance de l'installation pour mettre en relief les différences liées au subventionnement.

Dans cette partie, nous observerons de manière détaillée les calculs relatifs à une installation photovoltaïque de 3kW subventionnée par la rétribution unique. Ce cas a été retenu car cette puissance permet de couvrir la totalité des besoins en électricité d'un ménage consommant 3000 kWh par année (Swissolar, 2013b, p. 7). Dans la suite de cette partie, des captures d'écran commentées expliqueront l'utilisation du fichier Excel et présenteront les résultats financiers pour cette installation.

Données techniques et type de subventionnement

Pour connaître le rendement de l'installation, il est nécessaire de remplir cinq cases contenant différentes informations sur le projet : données techniques, subventionnement, données financières, achat/vente d'électricité et fiscalité. La partie relative aux données techniques se présente ainsi :

Tableau 7 : Données techniques pour une installation de 3 kWc

Données techniques	
m2 de panneaux solaires	21
Puissance installée (kWc)	3
Puissance max par m2 (Wc)	142,86
Type d'installation	Ajoutée
Catégorie de puissance	A
date mise en service	30.05.2014
Réduction annuelle de production	0,80%
Production annuelle initiale (kWh)	3540

Subventionnement	
Subventionnement de l'installation	oui
rétribution unique	rétribution unique

Source : Données de l'auteur

Les hypothèses suivantes sont formulées :

- Concernant le rapport surface en m^2 /puissance installée, le cas se basera sur l'estimation de Swissolar selon laquel 3 kWc installés correspondent à une surface de 21 m^2 (Swissolar, 2013b, p. 7) ;
- Les calculs seront toujours réalisés par rapport à des installations ajoutées ;
- Au fil du temps, les installations solaires perdent en efficacité. Les constructeurs garantissent généralement qu'à conditions équivalentes, une installation produit 20% de moins après 25 ans qu'initialement. Cela représente une réduction annuelle de 0,8% (Service de l'énergie et des forces hydrauliques, 2013d, p. 3);
- Production annuelle initiale : 3540 kWh.

La production annuelle initiale est obtenue au moyen de l'outil PVGIS. Ce simulateur, mis à disposition sur internet par l'union européenne, permet d'estimer la production d'une installation solaire après insertion de plusieurs variables de calcul. Pour cette installation, les données suivantes ont été saisies :

Figure 20 : Estimation de production pour une installation de 3 kWc située à Sion

Performance du système PV connecté au réseau

Base de données de radiation: **Climate-SAF PVGIS** [\[Qu'est-ce que c'est?\]](#)

Technologie PV: **Silicium cristallin**

Puissance PV crête installée **3** kWp

Pertes estimées du système [0;100] **14** %

Options montage fixé:

Position de montage: **Position libre**

Inclin. [0;90] **36** deg. ☐ Optimiser l'inclinaison

Azimut [-180;180] **2** deg. ☐ Optimiser aussi l'azimut
(Angle d'azimut de -180 à 180. Est=-90, sud=0)

Options du système de poursuite:

☐ Axe vertical Inclin. [0;90] **0** deg. ☐ Optimiser

☐ Axe incliné Inclin. [0;90] **0** deg. ☐ Optimiser

☐ Suiveur solaire à 2 axes

Fichier de l'horizon **Choisissez un fichier** Aucun fichier choisi

Source : PVGIS (Union européenne, 1995-2014)

Données financières

Après avoir rempli les parties relatives aux données techniques et au subventionnement, il faut compléter le tableau qui concerne les données financières relatives à l'investissement. Y sera notamment indiqué le coût de l'installation, les éventuelles subventions cantonales ou communales et les données relatives au financement du projet.

Tableau 8 : Données financières pour une installation de 3 kWc

Données financières		
Coût spécifique installation (CHF/kWc)		3 350
Coût total de l'installation		10 050
Subvention cantonale		
Subvention communale		
Investissement initiale		10 050
Financement		
Dette	80%	8 050
Fonds propres	20%	2 000
Taux intérêt de la dette		2,44%
Durée d'amortissement maximal		25 ans
Frais annuels d'entretien et d'assurance en CHF/kWh		0,05
Montant rétribution unique		3950

Source : Données de l'auteur

Les calculs seront basés sur les hypothèses suivantes:

- Le coût total est obtenu en multipliant le nombre de kWc par le coût spécifique. Ce dernier représente le coût d'investissement référence en CHF par kWc au niveau suisse pour l'année 2014 selon la classe de puissance et le type d'installation (Swissolar, 2014b, p. 2);
- Aucune subvention n'est accordée⁴ ;
- L'installation est financée par 20% de fonds propres et 80% de fonds étrangers. Une dette hypothécaire à un taux fixe de 2,44% est contractée (Comparis, 2014);
- Les frais annuels d'entretien et d'assurance se montent à 5 ct. par kWh produits. Ce montant relativement élevé a pour but d'intégrer les diverses révisions et une partie des coûts de remplacement de certaines pièces dont la durée de vie est moindre comme l'onduleur (BKW, 2014);

⁴ La commune de Sion n'offre pas de subventions pour les installations solaires photovoltaïques. Le document *Mesures d'aides financières des communes valaisannes dans le domaine de l'énergie* disponible sur le site de l'Etat du Valais recense l'ensemble des communes valaisannes et indique quelles subventions elles accordent.

- Le montant de la rétribution unique inclut une contribution de base de 1'400 CHF et un supplément découlant de la puissance installée (Swissolar, 2014b, p. 2).

Achat/vente d'électricité et fiscalité

Il faut maintenant indiquer les informations liées à l'achat et à la vente d'électricité. Sont inclus notamment les données relatives à l'autoconsommation, au tarif et à la durée de la RPC (si l'installation reçoit ce type de subvention), le temps d'attente avant de bénéficier de la RPC ainsi que le tarif d'achat et de vente du distributeur. Dans le tableau "Fiscalité", le taux marginal de déduction fiscale permet, multiplié à l'investissement déduit, de calculer le gain d'impôt (Service de l'énergie et des forces hydrauliques, 2013d) (fichier au format Excel). Le taux marginal d'imposition du revenu sert à calculer l'impôt sur le revenu supplémentaire provenant de la vente de l'énergie électrique générée par l'installation.

Tableau 9 : Achat/vente d'électricité et fiscalité pour une installation de 3 kWc

Achat/vente d'électricité	
Autoconsommation initiale (kWh/an)	0
Part de l'électricité produite vendue	100%
Tarif RPC (CHF)	aucun
Durée RPC	20 ans
Tarif rachat électricité par le distributeur (CHF/kWh)	0,150
Tarif achat électricité au distributeur (CHF/kWh)	0,15
Temps d'attente avant RPC (en année)	pas concerné

Fiscalité	
Taux marginal déduction fiscale	15%
Taux marginal imposition revenu	20%
Volume de production non-imposé (kWh)	10 000

Source : Données de l'auteur

Pour ce cas, les hypothèses suivantes seront retenues :

- L'électricité produite par l'installation est entièrement revendue au distributeur ;
- Le distributeur rachète l'électricité et la revend à 15 ct /kWh. Le tarif de rachat correspond à la moyenne entre la moyenne des prix heures creuses – pleine et la moyenne entre tarif simple – double. Les prix sont ceux pratiqués par l'ESR⁵(sources disponibles dans le fichier Excel annexé) ;
- Le taux marginal de déduction fiscale et d'imposition du revenu se montent respectivement à 15% et 20% ;
- Le volume de production non-imposé se monte à 10'000 kWh.

Résultats

En se basant sur un rendement attendu des fonds propres nuls, les résultats suivants ont été générés (les montants, sauf indications contraires, sont en CHF) :

Tableau 10 : Résultats financiers pour une installation de 3 kWc

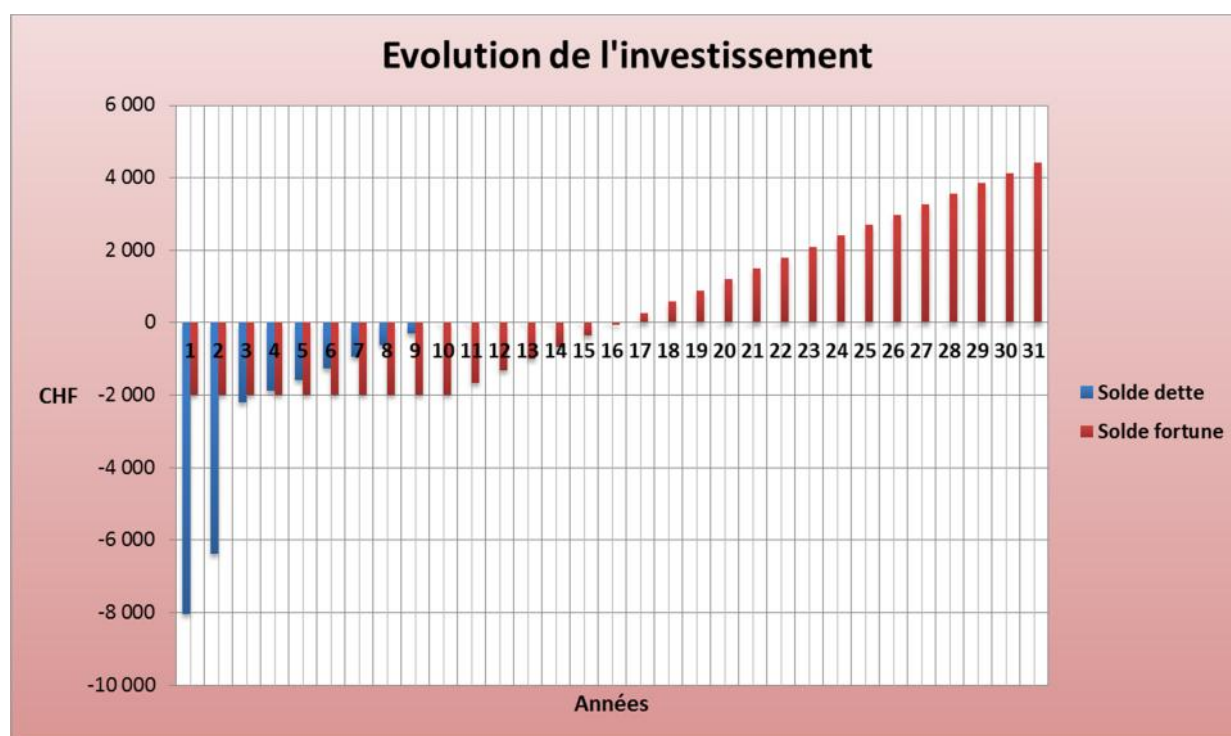
Breakeven	16 ans	Recettes sur 30 ans	14'449
Durée de remboursement de la dette	8 ans	Bénéfice 30 ans	4'399
Rendement annualisé du projet	1,22%	Economie d'impôt globale	4'435
Prix de revient du kWh sur 30 ans (ct.)	13,93	WACC	1,66%
Rendement annuel des capitaux propres	3,95%	VAN 30 ans	2'279,45
		TRI 30 ans	4,29%

Source : Données de l'auteur

Nous constatons que cette installation est rentable. En effet, le rendement annualisé du projet et la VAN sont positifs. Il est donc intéressant de procéder à l'investissement. La dette est remboursable en huit ans. Après 16 ans, les fonds propres investis et la dette sont totalement amortis. Tous les revenus nets à partir de cette année s'additionnent pour générer 14'449 CHF de recettes après 30 ans. Avec un coût moyen du capital pondéré à 1,66%, la valeur actuelle nette se monte à 2'279,45 CHF. Enfin, il est intéressant de relever que le prix de revient du kWh est d'environ 14 centimes. Le graphique suivant illustre l'évolution de l'investissement tout au long de la durée de vie de l'installation.

⁵ Dans tous les calculs réalisés dans ce dossier, l'évolution du prix de l'électricité ne sera pas prise en compte en raison de son imprévisibilité. Par conséquent, nous faisons l'hypothèse que le distributeur rachètera le courant à un prix identique pendant toute la durée de vie de l'installation.

Figure 21 : Évolution de l'investissement d'une installation de 3 kWc



Source : Données de l'auteur

4.2.5 Rendements des autres installations

Nous connaissons maintenant la méthode de calculs utilisée pour déterminer la rentabilité d'une installation de 3 kWc. Le processus étant identique dans les autres cas, je présenterai ici un tableau qui synthétise les résultats obtenus. Le détail des calculs est disponible en annexe VI.

Par ailleurs, ce fichier a été conçu pour être utilisé par des personnes physiques intéressées par des installations de petites et moyennes tailles. Néanmoins, j'ai pris la liberté de calculer le rendement de plus grandes installations à titre indicatif. Bien conscient que ces dernières sont construites par des personnes morales, j'ai toutefois effectué mes calculs en me basant sur les mêmes processus de décisions. Cette démarche est due à l'impossibilité de généraliser les résultats pour ce type d'installations en raison d'une personnalisation trop importante de certains paramètres en fonction du cas.

Tableau 11 : Synthèse des résultats pour chaque installation

Puissance installée	3 kWc		12 kWc				29 kWc				1 MWc	
Production annuelle	3'540		14'100									
Subventionnement	Rétribution unique		Rétribution unique		RPC		Rétribution unique		RPC		RPC	
Coût total de l'installation	10'050		30'600				73'950				220'000	
Dette	8'050		24'480				59'160				176'000	
Fonds propres	2'000		6'120				14'790				44'000	
Tarif rachat électricité par le distributeur (CHF/kWh)	0,15		0,082				0,082				0,082	
Tarif RPC (CHF/kWh)	-		-		0,264		-		0,264		0,22	
Montant rétribution unique	3'950		11'600		-		26'050		-		-	
Autoconsommation	0%	50%	0%	50%	0%	50%	0%	50%	0%	50%	0%	50%
Breakeven	16 ans	16 ans	jamais	19 ans	13 ans	16 ans	jamais	21 ans	15 ans	17 ans	17 ans	18 ans
Remboursement de la dette	8 ans	9 ans	25 ans	11 ans	10 ans	12 ans	25 ans	13 ans	11 ans	12 ans	13 ans	13 ans
Rendement annualisé	1,22%	1,21%	-0,91%	0,84%	2,24%	1,70%	-1,70%	0,65%	1,78%	1,50%	1,21%	1,30%
Prix de revient du KWh en ct.	13,93	13,93	11,71	11,81	11,76	11,74	11,63	11,77	11,72	11,71	10,78	10,78
Rendement annuel des capitaux propres	3,95%	3,93%	-2,66%	2,99%	5,98%	4,97%	-3,75%	2,47%	5,13%	4,57%	3,93%	4,13%
Recettes sur 30 ans	14'449	14'413	23'253	39'287	59'397	50'720	44'150	89'931	125'418	115'732	316'025	324'333
Bénéfice/perte sur 30 ans	4'399	4'363	-7'347	8'687	28'797	20'210	-29'800	15'981	51'468	41'782	96'025	104'333
Economie d'impôt globale	4'435	3'014	10'199	7'996	17'664	13'142	18'210	16'872	25'010	25'082	48'283	48'168
WACC	1,66%	1,66%	1,66%	1,66%	1,66%	1,66%	1,66%	1,66%	1,66%	1,66%	1,66%	1,66%
VAN 30 ans	2'279,45	2'250,40	-9'578,50	3'127	17'912,25	10'552,55	-32'871,55	3'149,95	28'739,95	19'897,80	39'051,30	42'655,50
TRI 30 ans	4,29%	4,26%	-3,31%	2,88%	6,06%	4,34%	-6,53%	2,16%	4,73%	3,77%	3,14%	3,20%

Données de l'auteur

Ce tableau permet de définir quelle taille d'installation est la plus rentable et, le cas échéant, quel type de subventionnement s'avère le plus approprié. Sur la base des données obtenues, la meilleure solution serait d'investir dans une installation de 12 kWc en choisissant d'être subventionné par la RPC et de revendre l'intégralité de la production. Hormis ce résultat, plusieurs généralités peuvent être dégagées.

Tout d'abord, le type de subventionnement est extrêmement important. Pour les installations ayant le droit d'option, il faut dans tous les cas opter pour la RPC. La rétribution unique s'avère ne pas être rentable pour les installations entre 10 et 30 kWc avec les paramètres utilisés, sauf si l'on consomme directement une partie de la production. Cela peut s'expliquer par le faible prix de rachat de l'électricité : par exemple, l'Énergie Sion Région (ESR) rachetait en 2013 le courant issu d'installations photovoltaïques bien plus haut qu'actuellement.

Tableau 12 : Tarifs ESR 2013-2014

Puissance de l'installation	Prix de rachat 2013 (hors taxes)	Prix de rachat 2014 (hors taxes)
Jusqu'à de 10 kWc	20 ct/kWh	15 ct/kWh
De 10 à 100 kWc	15 ct/kWh	Prix Swissix + 25%
Plus de 100 kWc	Prix Swissix + 25 %	Prix Swissix + 25%*

Source : Rachat de l'énergie (esr.ch, 2014)

Le prix Swissix pour le premier trimestre 2014 se montant à 5,214 centimes, le prix de rachat est trop faible pour que la rétribution unique compense l'investissement (OFEN, 2014b).

Ensuite, même si la rétribution unique n'est pour l'heure pas intéressante pour les installations disposant du droit d'option, il n'est pas certain que cela soit toujours le cas. D'une part, les tarifs RPC fixés pour une durée de 20 ans diminuent au fil des années en fonction de la baisse des coûts. D'autre part, le prix de l'énergie électrique est actuellement bas et peut très bien remonter dans l'avenir. Cela aurait pour conséquence d'augmenter les tarifs de rachat pratiqué par les distributeurs. Il est donc possible qu'une installation bénéficiant de la rétribution unique devienne rentable alors que nos calculs indiquaient que non.

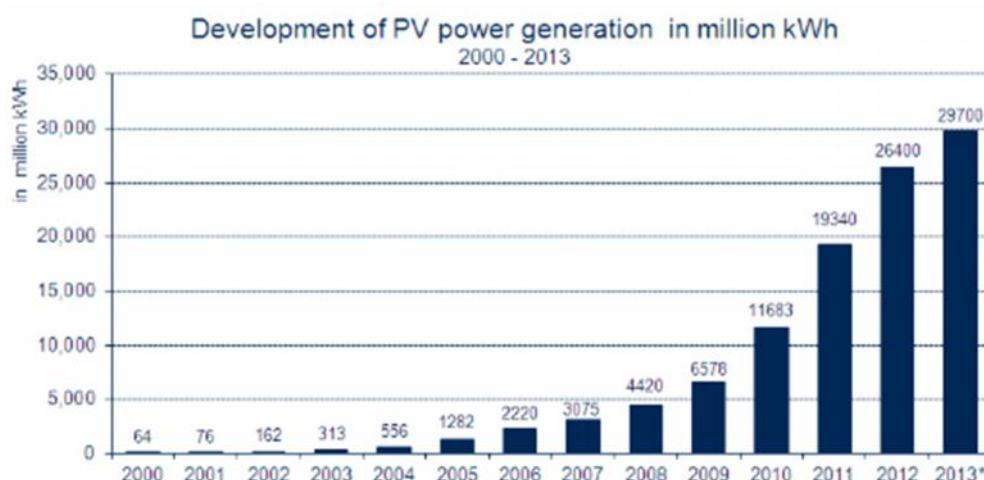
Pour terminer, nous avons observé que le prix du kWh diminue en fonction que la puissance et la taille de l'installation augmente. Ce résultat est intéressant car il ne prend pas en compte le prix de revente au distributeur. Cette tendance permet d'encourager le développement de grandes installations. En effet, leurs propriétaires peuvent essayer d'obtenir des conditions spéciales comme un subventionnement supplémentaire ou un tarif de rachat plus élevé. Si les éléments proposés permettent la rentabilité d'une installation, cela continuera d'encourager le développement de l'industrie solaire photovoltaïque. Ainsi, une plus grande quantité d'énergie électrique sera issue de source renouvelable et permettra, en partie, de remplacer l'énergie nucléaire.

Nous connaissons maintenant les rendements d'installations suisses de différentes tailles. La partie suivante a pour but de présenter la manière dont les coûts allemands ont évolué et de voir où ils se situent par rapport à d'autres moyens de production.

4.3 Allemagne

L'Allemagne fait figure de pionnier au niveau de la promotion d'énergie renouvelable. En effet, depuis l'an 2000 et l'entrée en vigueur de l'EEG, la production issue de ce type de ressource augmente continuellement. Cette loi permet notamment au producteur de vendre l'énergie électrique produite par son installation à un distributeur à un tarif prédéfini (Morris & Pehnt, 2012, p. 37). Reprise depuis dans de nombreux pays, elle a permis à l'industrie photovoltaïque de se développer rapidement.

Figure 22 : Production d'énergie électrique photovoltaïque en Allemagne



Source : Statistic data on the German Solar power (photovoltaic) industry (BMU, ÜNB, EEX, repris par BSW-Solar, 2014)

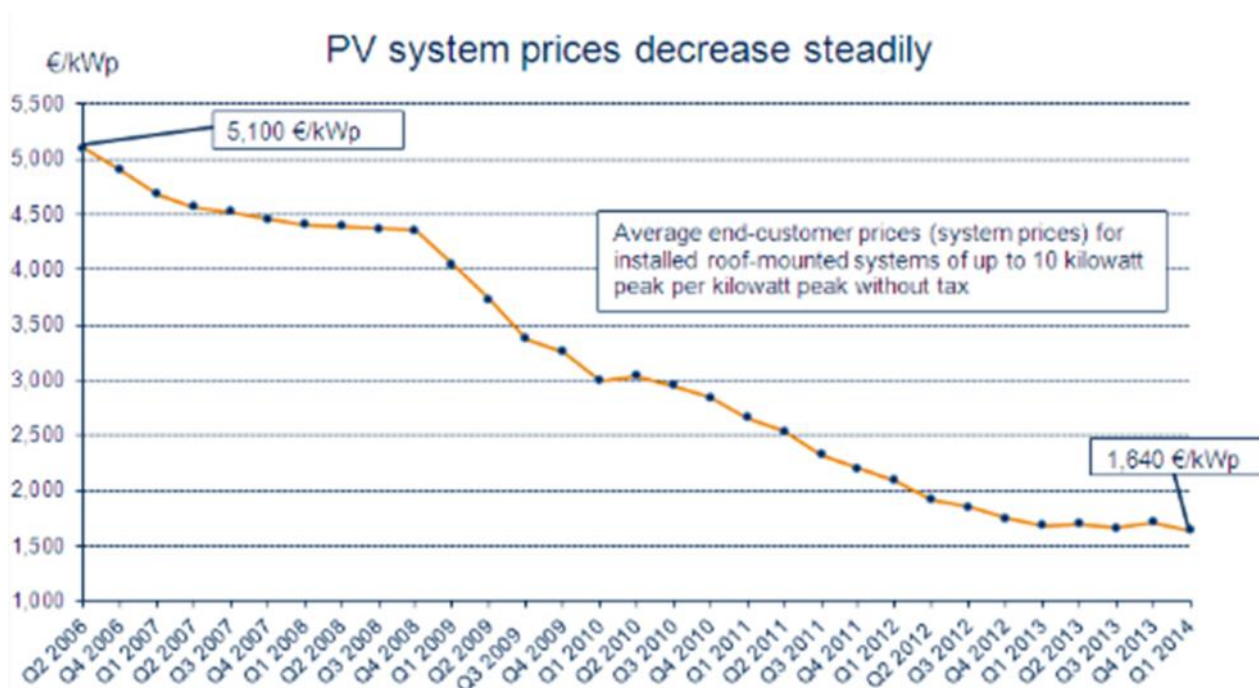
Grâce à cette politique énergétique encourageante, l'Allemagne a développé une forte capacité installée qui se montait à 35'700 MWc fin 2013. Par ailleurs, son rôle ne se limite pas à celui de consommateur d'installation solaire. Malgré l'émergence des entreprises chinoises sur le marché mondial, ce pays reste un acteur important de l'industrie photovoltaïque comme l'illustre ces statistiques relatives à l'année 2013 (BSW-Solar, 2014):

- Le secteur du solaire photovoltaïque employait entre 50'000 et 60'000 personnes à plein-temps en Allemagne ;
- 5'000 entreprises ont vendu des produits issus de l'industrie photovoltaïque. 200 d'entre elles fabriquaient des composants de système ;
- Sur le total des ventes de l'année, 65% étaient réalisées à l'étranger.

4.3.1 Évolution des prix

La situation de l'énergie photovoltaïque a évolué avec le temps. Ces installations, qui étaient auparavant difficilement rentables, ont vu leur prix baisser de manière importante au point de devenir une des énergies renouvelables les plus intéressantes sur le plan économique. Ainsi, le prix moyen par kWc d'une installation de 10 kWc a baissé de 67,8% depuis 2006, comme le montre le graphique suivant :

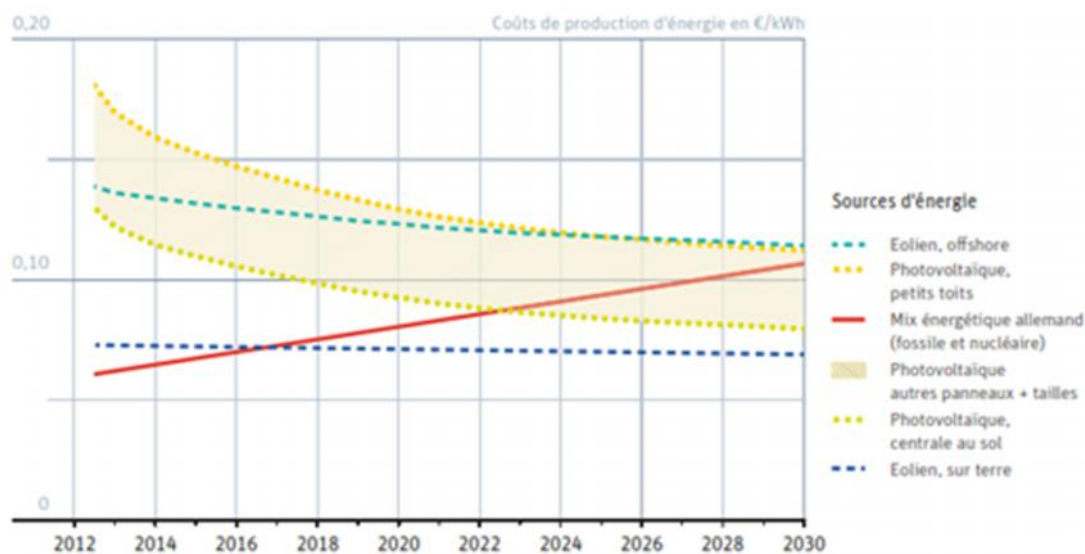
Figure 23 : Évolution du prix des installations PV de 10 kWc en Allemagne



Source : PV price index 2/2014 (BSW-Solar, 2014)

Cette baisse des coûts renforce l'attractivité de l'énergie solaire photovoltaïque. Le développement de cette ressource est primordial pour l'Allemagne. En plus de représenter une industrie importante du point de vue économique, le photovoltaïque est une des solutions qui permettrait de remplir les objectifs du pays en terme de politique énergétique. Couplée à une progression similaire des autres énergies renouvelables, cela faciliterait la sortie du nucléaire et permettrait de remplacer les moyens de production d'électricité nocifs pour l'environnement.

Figure 24 : Prévision de l'évolution des coûts de production d'électricité en Allemagne



Source : The German Energiewende (Fraunhofer ISE, repris par Morris & Pehnt, 2012)

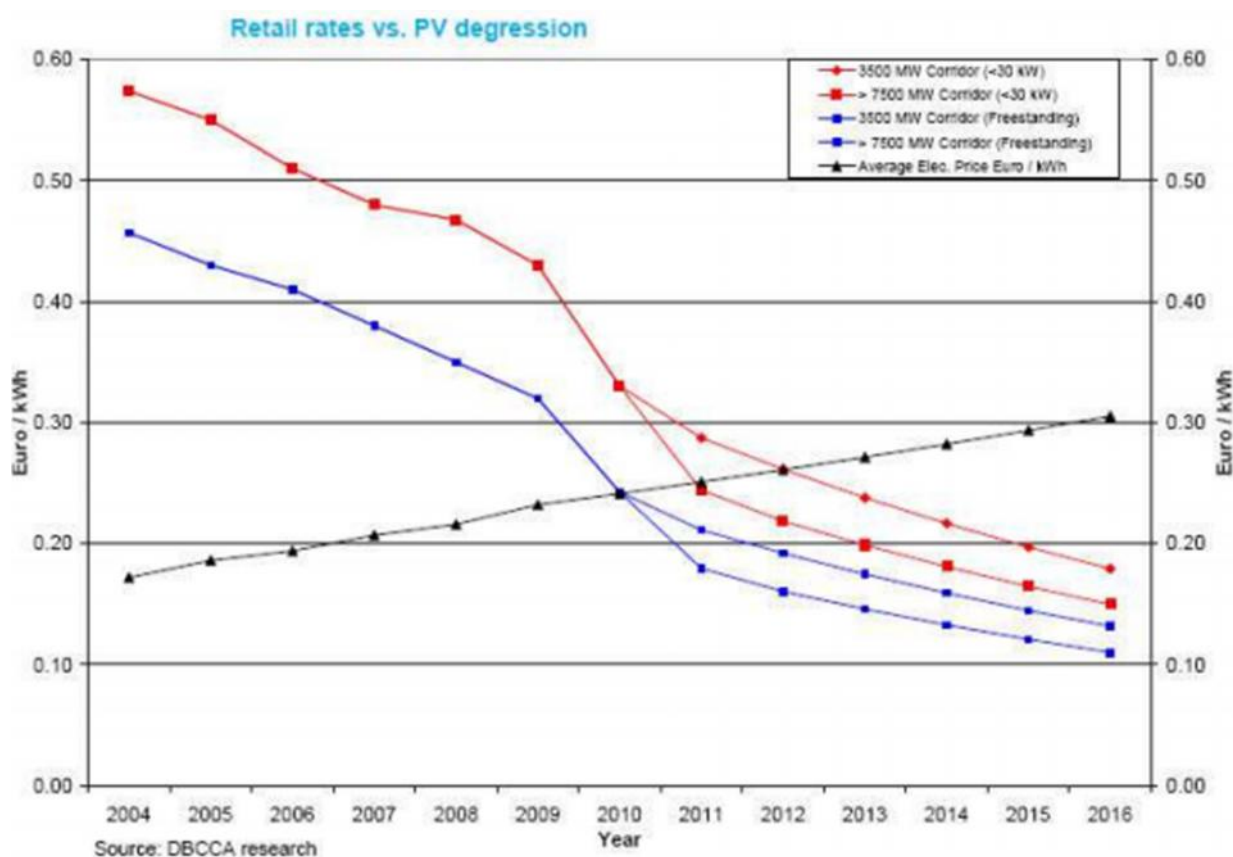
Ce graphique, qui illustre l'évolution des coûts par source d'énergie, permet de relever des observations intéressantes. Premièrement, l'énergie électrique d'origine fossile et nucléaire est pour l'heure la moins coûteuse. Cette situation devrait néanmoins rapidement changer car les coûts liés à ces types de production augmenteront fortement les prochaines années en raison de la raréfaction des ressources et des nouveaux standards en matière de normes environnementales. Par ailleurs, le coût du kWh d'origine renouvelable baissera plus ou moins fortement selon la technologie. La plus rentable reste l'énergie éolienne terrestre suivie par le solaire photovoltaïque. Le dernier élément important est la différence de prix entre l'énergie électrique produite par de petites installations photovoltaïques et de grandes installations. En effet, le coût du kWh pour une petite installation peut représenter jusqu'à 1,5 fois celui d'une grande installation. En se basant uniquement sur les coûts, les énergies à favoriser sont l'éolienne et le photovoltaïque (grandes installations et centrales au sol).

4.3.2 Parité réseau

Nous avons pu constater que les prix des installations allemandes avaient beaucoup baissé, notamment en raison de l'augmentation de la demande et des aides financières proposées par l'Etat. La question qui peut alors se poser est de savoir si l'énergie électrique photovoltaïque est moins chère que celle fournie par le réseau.

Selon une étude de la Deutsche Bank, reprise par energeia.voila.net, la parité réseau aurait été atteinte en 2012. Le graphique suivant illustre l'évolution du prix moyen de l'électricité en Allemagne et celle issue de différents types d'installations photovoltaïques.

Figure 25 : Prix de l'électricité photovoltaïque comparée à celle fournie par le réseau



Source : La parité réseau est atteinte en Allemagne pour l'électricité solaire photovoltaïque (Deutsche Bank, repris par energeia.voila.net 2013)

Il est important d'apporter quelques précisions à ce graphique. Tout d'abord, le tarif réseau est calculé toutes taxes comprises. Cela permet de comparer directement le prix de l'électricité issue de l'installation photovoltaïque et celui facturé par le distributeur aux consommateurs qui ne produisent pas leur propre énergie électrique. Ensuite, le prix moyen représenté par la courbe noire représente le tarif résidentiel. Ce graphique ne prend pas en

compte les prix industriels qui peuvent varier fortement en fonction de la consommation. Il est tout de même intéressant de savoir que le coût de production pour les nouvelles installations photovoltaïques (qui se situe entre 9,19 et 13,28 centimes d'euro par kWh) est inférieur au tarif hors TVA (14,44 centimes d'euro) d'un industriel qui consomme entre 500 et 2'000 MWh par année (energeia, 2014).

Le photovoltaïque connaît une évolution favorable en Suisse et en Allemagne. Les progrès technologiques et l'augmentation de la demande permettent aux constructeurs une baisse des coûts qui rend ce moyen de production attrayant. La section suivante a pour but d'exposer l'avenir du photovoltaïque en Suisse afin de comprendre les enjeux et difficultés liés à son développement.

5. L'avenir du photovoltaïque en Suisse

Les différentes parties de ce travail ont présenté les installations solaires photovoltaïques sous plusieurs angles. Nous connaissons maintenant les avantages et inconvénients liés à cette technologie et nous pouvons estimer le coût et le rendement d'une installation au moyen du fichier Excel en annexe. Les données et résultats obtenus nous montrent que le photovoltaïque est une technologie importante dont le développement permettrait de remplacer le nucléaire. Dans cette partie, nous reviendrons sur le potentiel des différentes alternatives en Suisse. Nous présenterons également l'impact d'une hausse importante de la demande en installations photovoltaïques et ses conséquences sur le mix-électrique suisse.

5.1 Remplacer le nucléaire

La Suisse fermera progressivement ses centrales nucléaires jusqu'en 2035. Elle doit donc trouver rapidement des alternatives afin de pouvoir satisfaire la demande d'énergie électrique. Le potentiel des différentes technologies a été chiffré dans le rapport *Perspectives énergétiques 2050* réalisé par l'OFEN :

Tableau 13 : Potentiel de développement en TWh des substituts au nucléaire d'ici 2050

Énergies renouvelables	24,2
Photovoltaïque	11,1
Énergie éolienne	4,3
Biomasse	1,2
Géothermie	4,4
Stations épurations des eaux usées, usines d'incinération et biogaz	3,2
Hydraulique	8,6
Grande et petite hydraulique	3,2
Centrales pompage-turbinage	5,4

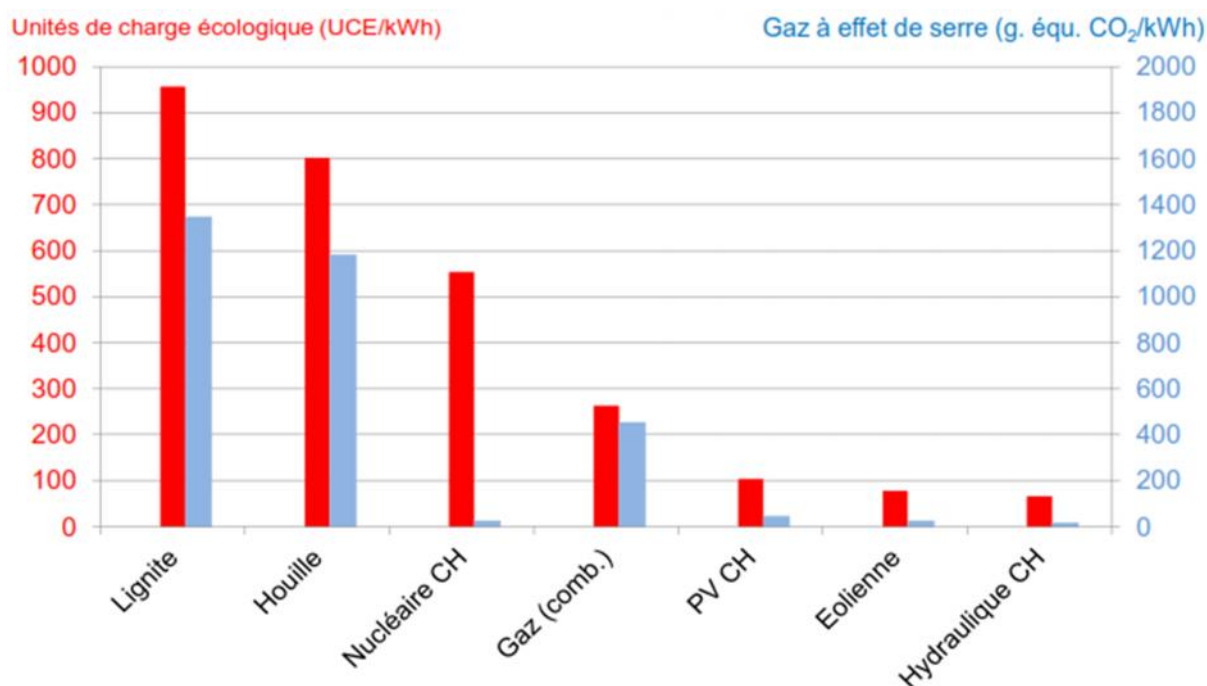
Adapté de Message relatif au premier paquet de mesures de la Stratégie énergétique 2050 (OFEN, 2013, p.6803)

D'après l'OFEN, le potentiel du photovoltaïque est d'environ 11 TWh d'ici 2050. L'AES (Association des entreprises électriques suisses) estime qu'il est possible d'atteindre 14 TWh à la même date. Ce scénario impliquerait d'exploiter 80% de la surface utilisable pour les installations photovoltaïques et la couverture d'environ 45% des surfaces bâties (Association des entreprises électriques suisse [AES], 2012, p. 4).

David Stickelberger, manager chez Swissolar (dont l'objectif est que 12 TWh de l'énergie électrique produite soit d'origine solaire d'ici 2025), estime qu'avec les mesures politiques actuelles, la croissance dans les années à venir devrait varier entre 300 et 400 MW. Si ses prédictions sont correctes, la production d'électricité d'origine photovoltaïque devrait augmenter d'environ 7 TWh d'ici 2035 (D. Stickelberger, CP, 23 avril 2014).

Ces estimations montrent que le solaire photovoltaïque est important car cette technologie possède le plus fort potentiel parmi les alternatives de production envisageables. Son développement permettrait à la Suisse de remplacer le nucléaire sans augmenter sa dépendance aux importations d'électricité. De plus, le faible impact environnemental rend ce moyen de production attrayant par rapport à certains substituts comme l'illustre l'image suivante :

Figure 26 : Impact de la production d'énergie électrique sur l'environnement



Source : L'énergie solaire : La réalité bien meilleure que les idées reçues (Dr. D. Rufer, 2014, p.3)

5.2 Impacts du photovoltaïque sur la production d'électricité suisse

Actuellement, plus de 24 TWh sont produits par des centrales nucléaires, soit environ 25% du mix-électrique suisse (OFS, 2014a). Le remplacement de cette source d'énergie par d'autres technologies renouvelables va demander une adaptation importante à plusieurs niveaux.

5.2.1 Modifications du réseau

Le réseau actuel a été conçu dans le but de distribuer le courant électrique produit par de grandes centrales de type nucléaire ou hydroélectrique. Avec le développement d'énergies comme le photovoltaïque, le principe est d'injecter le courant à partir de multiples petites et moyennes installations. Ce changement a pour conséquence de rendre le réseau plus instable. En effet, les injections décentralisées peuvent réduire ou augmenter la charge des réseaux de distribution et impactent la tension de ces derniers (AES, 2012, pp. 2,3).

Toujours d'après la même source, trois autres paramètres rendent plus difficile la gestion du réseau alimenté principalement par des installations solaires ou éoliennes : la prévisibilité, la flexibilité et la pilotabilité. En effet, ces deux technologies sont assez faiblement prévisibles et dépendent des conditions météorologiques. Il est donc nécessaire d'améliorer la régulation du réseau ainsi que la flexibilité en recourant par exemple à des moyens de stockage ou en exportant le surplus produit (p. 5).

L'AES estime que d'importantes modifications seront nécessaires si la puissance injectée par de petites installations réparties de manière homogène dépasse 7 TW. Par conséquent, elle recommande d'utiliser les technologies photovoltaïques et éoliennes dans les régions où elles sont le plus efficaces (AES, 2012, p. 13).

5.2.2 Le défi du stockage

L'inconvénient majeur du photovoltaïque, présenté plus tôt dans ce travail, demeure l'incapacité à contrôler la production d'énergie électrique. En effet, cette dernière est totalement dépendante de l'ensoleillement. En sachant que la demande atteint son apogée en soirée et la nuit et que la production photovoltaïque connaît un pic vers midi et en début d'après-midi, il en résulte un décalage entre production et consommation.

Mesures et projets

Comme présenté sous le point 2.5, il existe plusieurs façons de stocker l'électricité. La Suisse, contrairement à l'Allemagne, a l'avantage de disposer d'une forte capacité hydraulique. Cela lui permet donc de privilégier cette technique et d'utiliser d'autres technologies, comme les batteries, en fonction des besoins. La construction de nouveaux barrages étant difficilement possible, plusieurs moyens permettraient d'étendre les capacités de stockage des installations hydroélectriques (Püttgen, 2010, pp. 3,4) :

- Rénover les installations les plus anciennes ;
- Surélever certains barrages afin d'augmenter leur capacité de stockage ;
- Transformer certains bassins d'accumulation en station de pompage-turbinage.

Dans le rapport *Message relatif au premier paquet de mesures de la Stratégie énergétique 2050*, L'OFEN estime que les capacités de stockage des installations de pompage-turbinage actuellement installées ne sont pas suffisantes à long terme. D'après elle, le surplus produit par les installations solaires et éoliennes pendant l'été ne pourrait pas être stocké jusqu'en hiver. Afin de résoudre ce problème, plusieurs nouvelles stations sont en cours de construction ou en projet, comme l'illustre le tableau suivant (OFEN, 2013f, p. 6785).

Tableau 14 : Projets de stations de pompage-turbinage en Suisse

Installation	Région	Puissance	Statut
Nant-de-Drance	Valais	900 MW	En cours
Linth-Limmern	Glaris	1000 MW	En cours
Lago Bianco	Grisons	1000 MW	En projet
Grimsel 3	Berne	660 MW	En projet

Adapté de Message relatif au premier paquet de mesures de la Stratégie énergétique 2050
(OFEN, 2013, p. 6785)

Le problème du stockage journalier et saisonnier

Le temps de stockage d'énergie électrique peut varier en fonction des besoins. Il est possible de distinguer trois types de périodes (Jenni Energietechnik AG , p. 2) :

- court terme : quelques heures ou plusieurs jours en attendant un accroissement de la demande ;
- moyen terme : de quelques jours à plusieurs semaines en attendant un changement de conditions météorologiques ;
- long terme ou saisonnier : plusieurs semaines à quelques mois pour consommer l'énergie produite l'été en hiver.

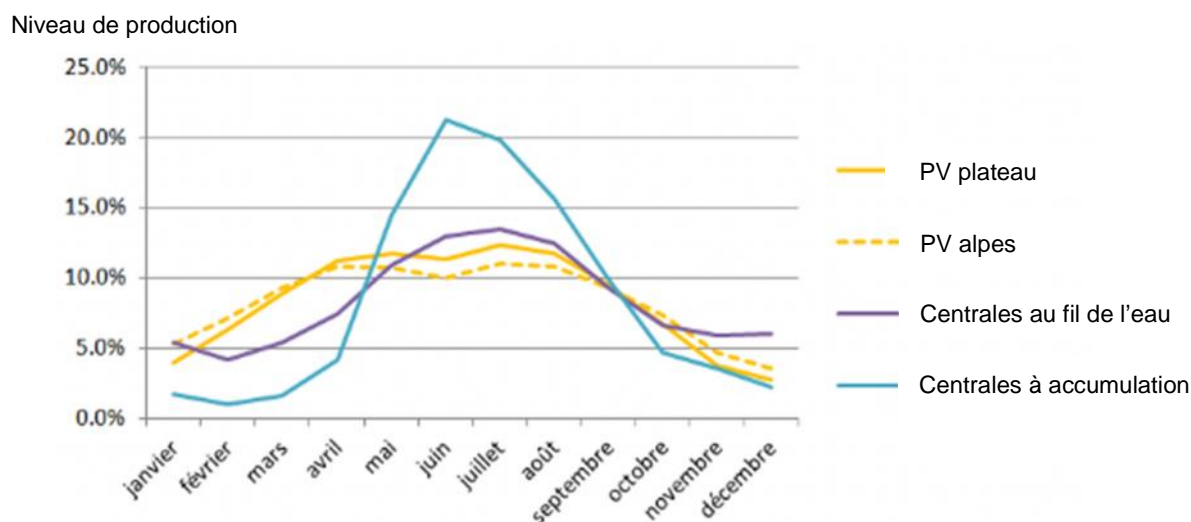
Dans son étude *L'évolution des besoins de stockage au fur et à mesure de la sortie du nucléaire, dans l'hypothèse où l'on remplace 70 % du nucléaire par du photovoltaïque*, Swissolar aborde la problématique du stockage saisonnier et la gestion du pic de production. Le scénario de base est le remplacement de l'énergie nucléaire par respectivement 70% de photovoltaïque (51% issus du plateau, 19% des alpes) et 30% d'un mix entre éolien et biomasse.

Deux éléments importants ressortent de cette étude. Tout d'abord, le développement du photovoltaïque provoquerait un déséquilibre journalier entre offre et demande d'électricité. Selon l'hypothèse d'étude de Swissolar, la puissance nominale installée en Suisse en 2035 se monterait à 18 GW. Un jour d'été ensoleillé sans nuage, déductions effectuées⁶, verrait la puissance d'injection totale dans le réseau se monter à 11 GW, auquel il faudrait rajouter les 3 GW produits par les centrales au fil de l'eau. La consommation pouvant baisser jusqu'à 6 GW un week-end d'été ensoleillé, il resterait un surplus d'environ 8 GW à absorber. D'ici 2020, les installations de pompage-turbinage permettront de stocker 6,1 GW. Décaler certaines consommations ferait déplacer 1 GW sur un autre moment de la journée et les progrès technologiques devraient permettre de construire des batteries qui pourraient soulager le réseau de distribution mais également de stocker temporairement 1 GW. Si toutefois il restait un surplus, il serait possible de recourir à l'exportation.

⁶ Les déductions contiennent les pertes liées à l'orientation et l'inclinaison de certains panneaux, les pertes dues à la transformation avant injection et celles liées à la programmation de certains onduleurs qui limitent l'injection à 70% de la puissance nominale des panneaux.

Ensuite, le problème du stockage saisonnier est atténué par la complémentarité entre l'hydraulique et le photovoltaïque. Les deux technologies ont pour caractéristique de produire plus l'été que l'hiver. Nous serions donc tentés de conclure que si nous utilisions ces deux moyens de production, il faudrait doubler les capacités de stockage. En réalité, une augmentation de 30% suffirait à maintenir le solde actuel entre importations et exportations. Cela s'explique par les différences entre les courbes de production des technologies illustrées sur la figure 27. Nous remarquons que la production photovoltaïque est plus étendue que l'hydraulique et que leurs creux respectifs ne se situent pas à la même période (décembre pour le photovoltaïque, février pour l'hydraulique au fil de l'eau). Par conséquent, les deux technologies sont complémentaires puisqu'elles peuvent compenser mutuellement leurs baisses de production.

Figure 27 : Répartition de la production électrique sur l'année (moyenne 2008-2011)



Adapté de L'évolution des besoins de stockage au fur et à mesure de la sortie du nucléaire, dans l'hypothèse où l'on remplace 70 % du nucléaire par du photovoltaïque (Swissolar, 2012b, p.4)

Impacts sur les installations hydroélectriques

Le développement des énergies photovoltaïques et éoliennes va influencer le schéma d'exploitation des stations de pompage-turbinage. Actuellement, l'eau est pompée lorsque la demande est faible et les prix sont bas. Elle est turbinée le matin et le soir, lorsque la consommation augmente. La croissance du nombre d'installations issues des technologies précédemment citées vont réduire les cycles de pompage et de turbinage. Par exemple, le pompage devra être effectué en milieu de journée, lorsque les panneaux photovoltaïques

produiront une grande quantité d'énergie. Ce raccourcissement des cycles et l'intensification d'utilisation des centrales auront pour conséquences d'augmenter leurs coûts d'exploitation et d'entretien (AES, 2013, pp. 9,10).

Cette augmentation des coûts est une mauvaise nouvelle car les centrales hydro-électriques souffrent déjà du faible prix de l'électricité. Les injections massives de courant d'origine photovoltaïque ou éolienne en provenance d'Allemagne en sont la cause. Néanmoins, cette situation ne devrait être que temporaire. D'après Swissolar, une augmentation de la puissance photovoltaïque installée en Allemagne permettrait de se passer des centrales à gaz, des centrales nucléaires et des mines de charbon. L'utilisation de courant d'origine solaire aura pour conséquence d'augmenter le prix du pic de pointe, qui a lieu pendant la soirée. Ce processus devrait permettre une remontée générale des prix et offrir ainsi une meilleure rentabilité aux stations de pompage-turbinage (Swissolar, 2012b, p. 16).

Cette partie nous permet de mieux comprendre le défi auquel la Suisse fait face. Il faut trouver des alternatives au nucléaire et l'énergie solaire photovoltaïque en est une. Bien évidemment, recourir à cette technologie demandera des adaptations, notamment au niveau du réseau. Toutefois, les difficultés liées au stockage ne sont pas aussi importantes qu'imaginées. Le potentiel du photovoltaïque est réel. Son évolution dépend de la promotion de cette technologie par les politiciens.

Conclusion

Cette étude a permis de constater que la Suisse est au début de son tournant énergétique en comparaison à l'Allemagne. Les énergies renouvelables sont favorisées aux travers de subventionnements comme la rétribution unique ou la rétribution à prix coûtant du courant injecté. Toutefois, les mesures actuelles ne sont pas suffisantes et ne permettraient pas de remplacer totalement l'énergie électrique issue du nucléaire. Le photovoltaïque dispose d'un potentiel important. Sa rentabilité, bien que diminuée par les faibles prix actuels sur le marché de l'électricité, devrait augmenter grâce aux progrès technologiques et à une remontée des prix liée à l'abandon progressif d'une partie de la production issue des énergies fossiles.

La sortie du nucléaire exige de trouver des alternatives pour continuer à pouvoir répondre à la demande d'énergie électrique. Parmi elles, le photovoltaïque est la technologie possédant le plus fort potentiel. Toutefois, son développement nécessite une rénovation d'une partie du réseau électrique ainsi qu'une augmentation des capacités de stockage. Ces inconvénients sont compensés par la complémentarité du photovoltaïque avec les autres énergies renouvelables et sa faible empreinte écologique. Pour promouvoir cette ressource, il faudrait accentuer la communication sur son rôle dans la transition énergétique. Une idée serait de mettre en avant le fait de pouvoir produire son propre courant de manière écologique. De plus, il faudrait augmenter les incitations à produire du renouvelable. Par exemple, certaines procédures administratives pourraient être simplifiées et de nouvelles subventions permettraient d'encourager la population à opter pour ce moyen de production d'électricité.

Les principales limites de ce travail se situent au niveau des données relatives aux différentes évolutions. En effet, certains chiffres sont basés sur des calculs incluant des hypothèses ou des scénarios. Par conséquent, il n'est pas certain que les données présentées se confirment dans le futur. Certaines informations précises n'ont par ailleurs pas pu être trouvées, comme une présentation uniforme de la structure de l'évolution des coûts d'une installation photovoltaïque. Enfin, les calculs portants sur les installations de différentes tailles se veulent représentatifs et ne tiennent pas compte de l'évolution du prix de

l'électricité. Chaque installation possède ses propres caractéristiques et paramètres desquels découleront des résultats spécifiques.

Pour prolonger cette étude, il serait intéressant de chiffrer le coût de la sortie du nucléaire et de faire le point sur la situation dans quelques années pour voir si les scénarios présentés vont se réaliser. En conclusion de ce travail, je reprendrai les propos de Mme Doris Leuthard, Cheffe du département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication qui répondait à l'illustré le 4 avril 2013 :

"Certes, mais en Suisse seul 0,5% de l'électricité est produite via le photovoltaïque, contre 10% en Allemagne..."

" Vous avez raison: jusqu'à présent, la Suisse a disposé en suffisance d'énergie nucléaire et hydraulique pour pouvoir se passer du photovoltaïque. Dans le futur, cela va changer et je crois que l'on peut justement profiter des expériences que certains pays plus avancés ont faites pour ne pas répéter les mêmes erreurs." (Vassaux, 2013)

Bibliographie

- actufinance.fr (2014). *Coût moyen pondéré du capital*. Consulté le 30 Avril 2014 sur actufinance.fr: <http://definition.actufinance.fr/co-t-moyen-pondere-du-capital-758/>
- AES. (2012). Impacts des importations et de l'injection stochastique décentralisée sur le réseau. Aarau, Suisse. (Document de type PDF).
- AES. (2013). Rôle des centrales de pompage-turbinage dans l'approvisionnement en électricité. Aarau, Suisse. (Document de type PDF).
- AG Energiebilanzen e.V. (2014). *Stromerzeugung 1990 - 2013*. Allemagne. (Document de type PDF).
- Agence des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique [AEE]. (2010). *Énergies renouvelables: tenir compte des avantages plutôt que des préjugés*. Berne, Suisse. (Document de type PDF).
- Agence locale de l'énergie et du climat - agglomération grenobloise [ALEC]. (2011). *Le solaire photovoltaïque*. Consulté le 4 Mars 2014 sur [alec-grenoble.org](http://www.alec-grenoble.org/5905-solaire-photovoltaïque.htm): <http://www.alec-grenoble.org/5905-solaire-photovoltaïque.htm>
- Amjahdi, M., & Lemale, J. (2011). *Adopter le solaire thermique et photovoltaïque*. Paris: Dunod.
- Assemblée fédérale - Parlement suisse. (2012). *Recyclage et élimination des panneaux solaires*. Consulté le 16 Avril 2014 sur [parlament.ch](http://www.parlament.ch/f/suche/pages/geschaefte.aspx?gesch_id=20123611): http://www.parlament.ch/f/suche/pages/geschaefte.aspx?gesch_id=20123611
- Association "Sortir du nucléaire". (2011). *Où en sommes-nous avec la sortie du nucléaire*. Consulté le 4 Juillet 2014 sur [sortirdunucleaire.ch](http://www.sortirdunucleaire.ch): <http://www.sortirdunucleaire.ch/>
- Association des entreprises électriques suisse [AES]. (2012). *Électricité photovoltaïque et solaire thermique*. Aarau, Suisse. (Document de type PDF).
- BDEW. (2013). *Brutto-Stromerzeugung 2012 nach Energieträgern in Deutschland*. Consulté le 18 Mars 2014 sur www.bdew.de: https://www.bdew.de/internet.nsf/id/DE_Brutto-Stromerzeugung_2007_nach_Energietraegern_in_Deutschland
- BKW. (2014). *Calcul du rendement énergétique d'une installation photovoltaïque*. Consulté le 1^{er} Mai 2014 sur [bkw.ch](http://www.bkw.ch): <http://www.bkw.ch/calcul-du-rendement-energetique.html>
- Boisgibault, L. (2011). *L'énergie solaire après Fukushima: la nouvelle donne*. Paris: Medicilline.
- BSW-Solar. (2014). *Statistic data on the German Solar power (photovoltaic) industry*. Allemagne. (Document de type PDF).
- Bundesverband WindEnergie. (2014). *Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)*. Consulté le 26 Mars 2014 sur [eeg-aktuell.de](http://www.eeg-aktuell.de): <http://www.eeg-aktuell.de/das-eeg/>
- Cogiterra. (2014). *Définition kilowattheure*. Consulté le 18 Mars 2014 sur www.actu-environnement.com: http://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/kilowattheure_kwh.php4
- Commission européenne. (2013). *Droits antidumping provisoires sur les panneaux chinois*. Consulté le 24 Avril 2014 sur europa.eu: http://europa.eu/rapid/press-release_IP-13-501_fr.htm
- Comparis. (2014). *Aperçu des hypothèques à taux fixe*. Consulté le 1^{er} Mai 2014 sur [comparis.ch](http://fr.comparis.ch): <http://fr.comparis.ch/hypotheken/zinssatz/laufzeiten.aspx?termid=10&cantoncode=VS&loantovalueratotype=80&isforselfusage=0>

- DENA. (2013a). *Conditions cadres*. Consulté le 2 Avril 2014 sur renewables-made-in-germany.com: <http://www.renewables-made-in-germany.com/fr/renewables-made-in-germany-accueil/energie-hydroelectrique/energie-hydroelectrique/conditions-cadre.html>
- DENA. (2013b). *Perspectives*. Consulté le 2 Avril 2014 sur renewables-made-in-germany.com: <http://www.renewables-made-in-germany.com/fr/renewables-made-in-germany-accueil/energie-hydroelectrique/energie-hydroelectrique/perspective.html>
- DETEC. (2012). *Priorités de la stratégie énergétique 2050*. Consulté le 16 Février 2014 sur uvek.admin.ch: <http://www.uvek.admin.ch/themen/03507/03509/03512/index.html?lang=fr>
- DETEC. (2014). *Révision de l'ordonnance sur l'énergie au 1er avril 2014*. Consulté le 11 Mars 2014 sur uvek.admin.ch: <http://www.uvek.admin.ch/dokumentation/00474/00492/index.html?lang=fr&msg-id=52243>
- Deutsche Energie-Agentur [DENA]. (2013). *Energie hydraulique*. Consulté le 2 Avril 2014 sur renewables-made-in-germany.com: <http://www.renewables-made-in-germany.com/fr/renewables-made-in-germany-accueil/energie-hydroelectrique/energie-hydroelectrique/vue-densemble.html>
- EcologieShop. (2014). *Batterie solaire pour stocker l'énergie*. Consulté le 4 Mars 2014 sur ecologie-shop.com: <http://www.ecologie-shop.com/conseils/installation-photovoltaïque-pour-site-isole-batterie-solaire-pour-stocker-l-energie-16>
- energeia. (2014). *La parité réseau est atteinte en Allemagne pour l'électricité solaire photovoltaïque*. Consulté le 7 Mai 2014 sur energeia.voila.net: http://energeia.voila.net/solaire/parite_allemande.htm
- Energie facteur 4. (2014). *Dimensionner son projet photovoltaïque*. Consulté le 30 Avril 2014 sur ef4.be: <http://www.ef4.be/fr/photovoltaïque/aspects-techniques/dimensionnement-projet-photovoltaïque.html>
- enerzine. (2014). *Une batterie à flux organique pour stocker les énergies renouvelables*. Consulté le 12 Mars 2014 sur enerzine.com: <http://www.enerzine.com/603/16782+une-batterie-a-flux-organique-pour-stocker-les-energies-renouvelables+.html>
- European Commission . (2012). *Statistiques sur les énergies renouvelables*. Consulté le 24 Mars 2014 sur epp.eurostat.ec.europa.eu: http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Renewable_energy_statistics/fr
- European photovoltaic industry association [EPIA]. (2013). *Global Market Outlook for Photovoltaics 2013-2017*. (Document de type PDF).
- Fédération romande pour l'énergie. (2013). *Accord sur l'électricité Suisse-UE: le temps presse, pourtant les négociations s'enlisent*. Consulté le 12 Mars 2014 sur frenergie.ch: <http://www.frenergie.ch/fre-bulletin/accord-sur-lelectricite-suisse-ue-le-temps-presse-pourtant-les-negociations-senlisent-version-longue/>
- IFP énergies nouvelles. (2014). *les technologies actuelles de stockage et leur état de maturité*. Consulté le 12 Mars 2014 sur ifpenergiesnouvelles.fr: <http://www.ifpenergiesnouvelles.fr/espace-decouverte/les-cles-pour-comprendre/le-stockage-massif-de-l-energie/les-technologies-actuelles-de-stockage-et-leur-etat-de-maturite>
- IFSN. (2013). *Installations nucléaires en Suisse*. Consulté le 18 Février 2014 sur IFSN

- Inspection fédérale de la sécurité nucléaire: <http://www.ensi.ch/fr/installations-nucleaires/installations-nucleaires-en-suisse/>
- Jenni Energietechnik AG . (2013). La transition énergétique est une question de stockage . Oberburg bei Burgdorf, Suisse. (Document de type PDF).
- Le Monde. (2011). *L'Allemagne officialise sa sortie du nucléaire*. Consulté le 24 Mars 2014 sur [lemonde.fr](http://www.lemonde.fr/europe/article/2011/05/30/l-allemande-officialise-sa-sortie-du-nucleaire_1529140_3214.html): http://www.lemonde.fr/europe/article/2011/05/30/l-allemande-officialise-sa-sortie-du-nucleaire_1529140_3214.html
- Leimgruber, J., & Prochinig, U. (2009). *La comptabilité comme instrument de gestion*. Zurich: Verlag SKV.
- Missions allemandes en France. (2012). *L'Allemagne amorce son tournant énergétique*. Consulté le 24 Mars 2014 sur [allemagne.diplo.de](http://www.allemagne.diplo.de/Vertretung/frankreich/fr/12-developpement-durable/01-energie/00-energie-uebseite.html): <http://www.allemagne.diplo.de/Vertretung/frankreich/fr/12-developpement-durable/01-energie/00-energie-uebseite.html>
- Morris, C., & Pehnt, M. (2012). La transition énergétique - l'Energiewende allemande. Berlin, Allemagne. (Document de type PDF).
- OFEN. (2012). Le potentiel hydroélectrique de la Suisse. Document de type PDF).
- OFEN. (2013a). *Energie nucléaire*. Consulté le 15 Février 2014 sur [bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch/themen/00511/?lang=fr): <http://www.bfe.admin.ch/themen/00511/?lang=fr>
- OFEN. (2013b). *Perspectives énergétiques 2050*. Bern. (Document de type PDF).
- OFEN. (2013c). *Force hydraulique*. Consulté le 25 Février 2014 sur [bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch/themen/00490/00491/index.html?lang=fr): <http://www.bfe.admin.ch/themen/00490/00491/index.html?lang=fr>
- OFEN. (2013d). *Energie éolienne*. Consulté le 11 Mars 2014 sur [bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch/themen/00490/00500/index.html?lang=fr): <http://www.bfe.admin.ch/themen/00490/00500/index.html?lang=fr>
- OFEN. (2013e). *Energie solaire*. Consulté le 12 Mars 2014 sur [bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch/themen/00490/00497/?lang=fr): <http://www.bfe.admin.ch/themen/00490/00497/?lang=fr>
- OFEN. (2013f). Message relatif au premier paquet de mesures de la Stratégie énergétique 2050. Bern, Suisse. (Document de type PDF).
- OFEN. (2013g). *Rétribution à prix coûtant du courant injecté*. Consulté le 18 Février 2014 sur [bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch/themen/00612/02073/index.html?lang=fr#): <http://www.bfe.admin.ch/themen/00612/02073/index.html?lang=fr#>
- OFEN. (2014a). Rétributions uniques pour les petites installations photovoltaïques. Berne. (Document de type PDF).
- OFEN. (2014b). *Recherche - prix trimestriels pondérés*. Consulté le 28 Avril 2014 sur [bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch/suchen/index.html?keywords=swissix&go_search=rechercher&lang=fr&site_mode=intern&nsb_mode=yes&search_mode=AND#volltextsuche): http://www.bfe.admin.ch/suchen/index.html?keywords=swissix&go_search=rechercher&lang=fr&site_mode=intern&nsb_mode=yes&search_mode=AND#volltextsuche
- Office fédérale de la statistique [OFS]. (2013). Graphiques de la statistique suisse de l'électricité 2012. Berne. (Document de type PDF).
- Office fédérale de l'énergie [OFEN]. (2013). *Statistique suisse de l'électricité 2012*. Bern.
- OFS. (2014a). *Production d'électricité*. Consulté le 25 Février 2014 sur [bfs.admin.ch](http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/fr/index/themen/08/02/blank/key/elektrizitaetserzeugung.html): <http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/fr/index/themen/08/02/blank/key/elektrizitaetserzeugung.html>
- OFS. (2014b). *Encyclopédie statistique*. Consulté le 9 Avril 2014 sur [bfs.admin.ch](http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/fr/index/themen/08/22/lexi.html): <http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/fr/index/themen/08/22/lexi.html>
- Püttgen, H. B. (2010). La Suisse électrique du futur. Suisse. (Document de type PDF).
- recyconsult. (2010). *Silicium amorphe*. Consulté le 2 Juin 2014 sur [www.dictionnaire-environnement.com](http://www.dictionnaire-environnement.com/silicium_amorphe_ID3102.html): http://www.dictionnaire-environnement.com/silicium_amorphe_ID3102.html

- Riolet, E. (2011). *L'énergie solaire et photovoltaïque pour le particulier*. Paris: Eyrolles.
- Service de l'énergie et des forces hydrauliques. (2012). Le canton du Valais soutient l'énergie solaire photovoltaïque. Sion. (Document de type PDF).
- Service de l'énergie et des forces hydrauliques. (2013a). *Stratégie efficacité et approvisionnement en énergie - Canton du Valais*. Sion.
- Service de l'énergie et des forces hydrauliques. (2013b). *Stratégie détaillée "Energie éolienne"*. Sion.
- Service de l'énergie et des forces hydrauliques. (2013c). *Stratégie détaillée "Energie solaire photovoltaïque"*. Sion.
- Service de l'énergie et des forces hydrauliques. (2013d). *Solaire photovoltaïque*. Consulté le 1^{er} Mai 2014 sur vs.ch:
<http://www.vs.ch/navig/navig.asp?MenuID=30463&RefMenuID=0&RefServiceID=0>
- Service de l'énergie et des forces hydrauliques. (2014). *Solaire photovoltaïque*. Consulté le 22 Mars 2014 sur vs.ch:
<https://www.vs.ch/Navig/navig.asp?MenuID=30463&Language=fr>
- Services cantonaux de l'énergie et de l'environnement. (2014). *Electricité - Ne pas confondre W et kWh*. Consulté le 12 Février 2014 sur energie-environnement.ch:
<http://www.energie-environnement.ch/electricite/425>
- Soleol SA. (2014). *Energie solaire - Comment ça marche ?* Consulté le 15 Février 2014 sur www.soleol.ch: <http://www.soleol.ch/principe-energie-solaire.php>
- Suisse-Eole. (2014). *Accueil*. Consulté le 11 Mars 2014 sur [suisse-eole.ch](http://www.suisse-eole.ch): www.suisse-eole.ch
- Swissgrid. (2013). *Prestation de services système*. Consulté le 18 Février 2014 sur [swissgrid.ch](http://www.swissgrid.ch):
https://www.swissgrid.ch/content/swissgrid/fr/home/experts/topics/ancillary_services.html
- Swissgrid. (2014). *Rétribution d'énergies renouvelables*. Consulté le 16 Avril 2014 sur [swissgrid.ch](http://www.swissgrid.ch):
http://www.swissgrid.ch/swissgrid/fr/home/experts/topics/renewable_energies/remuneration_re.html
- Swissolar. (2012a). *Comment produire 20% d'électricité solaire en 2025*. Fribourg, Suisse. (Document de type PDF).
- Swissolar. (2012b). *L'évolution des besoins de stockage au fur et à mesure de la sortie du nucléaire, dans l'hypothèse où l'on remplace 70% du nucléaire par du photovoltaïque*. Suisse. (Document de type PDF).
- Swissolar. (2013a). *RPC*. Consulté le 18 Février 2014 sur [swissolar.ch](http://www.swissolar.ch):
<http://www.swissolar.ch/fr/nos-themes/rpc/>
- Swissolar. (2013b). *L'électricité solaire, une énergie inépuisable*. Consulté le 12 Mars 2014 sur [swissolar.ch](http://www.swissolar.ch): <http://www.swissolar.ch/fr/photovoltaique/faq/>
- Swissolar. (2013c). *Organisation de recyclage des modules photovoltaïques*. (Document de type PDF).
- Swissolar. (2013d). *Marché du photovoltaïque en Suisse*. (Document de type PDF).
- Swissolar. (2014a). *Photovoltaïque - Technique*. Consulté le Mars 3, 2014, sur [swissolar.ch](http://www.swissolar.ch):
<http://www.swissolar.ch/fr/photovoltaique/technique/>
- Swissolar. (2014b). *Informations et chiffres*. Fribourg, Suisse. (Document de type PDF).
- Swissolar. (2014c). *Calculateur d'énergie solaire*. Consulté le 16 Avril 2014 sur [swissolar.ch](http://www.swissolar.ch):
<http://www.swissolar.ch/fr/pour-les-maitres-douvrages/calculateur-denergie-solaire/>
- La Télé. (2013). *Le solaire pourra-t-il remplacer le nucléaire* [Reportage].

Vassaux, F. (2013). Doris Leuthard: «Montrer les diverses options face au nucléaire est important». *L'Illustré magazine*.

Annexes

Annexe I : Historique de la production d'électricité en Suisse

Source : OFEN (2013). Historique de la production d'électricité en Suisse

Récupéré sur

<http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/fr/index/themen/08/02/blank/key/elektrizitaetserzeug ung.html>

Tableau : Production d'électricité en Suisse (GWh)

Production d'électricité

T 8.2.4.1

En GWh

	Centrales hydrauliques	Centrales nucléaires	Centrales thermiques classiques	Renouvelables divers 1)	Production brute		Production nette
					Moins le pompage		
1970	31 273	1 850	1 763	...	34 886	965	33 921
1980	33 542	13 663	957	...	48 162	1 531	46 631
1990	30 675	22 298	1 013	88	54 074	1 695	52 379
2000	37 851	24 949	2 371	177	65 348	1 974	63 374
2010	37 450	25 205	3 121	476	66 252	2 494	63 758
2011	33 795	25 560	2 861	665	62 881	2 466	60 415
2012	39 906	24 345	2 847	921	68 019	2 411	65 608

1) Chauffages au bois et en partie au bois, Installations à biogaz, Installations photovoltaïques, Eoliennes; Relevés dès 1990

Office fédéral de l'énergie, Statistique suisse de l'électricité

Renseignements: Michael Kost, 031 322 56 14, michael.kost@bfe.admin.ch

© OFS - Encyclopédie statistique de la Suisse

Annexe II : Période d'exploitation des centrales nucléaires

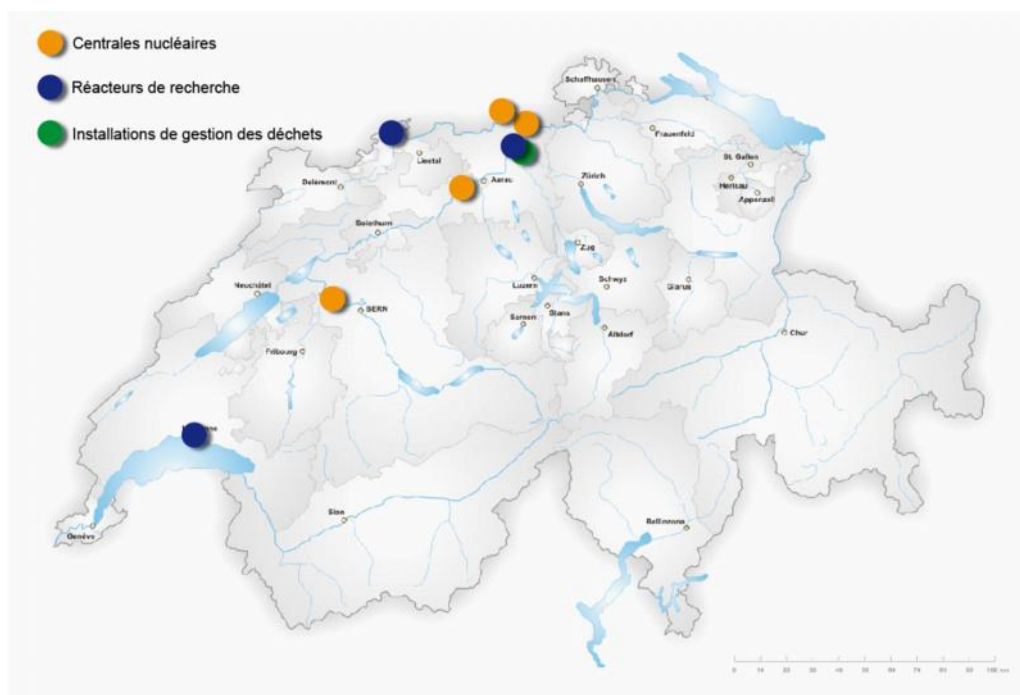
Source : site de l'Inspection fédérale de la sécurité nucléaire (IFSN)

Récupéré sur

<http://www.ensi.ch/fr/installations-nucleaires/installations-nucleaires-en-suisse/>

À l'heure actuelle, cinq centrales nucléaires sont actives sur le territoire suisse alémanique : la centrale de Beznau qui utilise deux réacteurs, Mühleberg, Gösgen et Leibstadt.

Figure: Installations nucléaires en Suisse



Source : site de l'IFSN

Récupéré sur <http://www.ensi.ch/fr/installations-nucleaires/installations-nucleaires-en-suisse/>

Ces installations ne seront pas remplacées à la fin de leur durée d'utilisation. La Suisse vise donc une sortie progressive du nucléaire. Le tableau suivant, qui figure en page cinq du document *Perspectives énergétiques* de l'OFEN, indique la date de fermeture de chaque centrale en se basant sur une durée d'utilisation de 50 ans.

Tableau: Période d'exploitation des centrales nucléaires suisses

Centrales nucléaires (CN)	Durée d'exploitation dans la variante d'offre 2 du Conseil fédéral
Beznau I (365 MW _{el})	1969 – 2019
Beznau II (365 MW _{el})	1972 – 2022
Mühleberg (373 MW _{el})	1972 – 2022
Gösgen (985 MW _{el})	1979 – 2029
Leibstadt (1190 MW _{el})	1984 – 2034

Sources : Perspectives énergétiques (OFEN, 2013)

Récupéré sur <http://www.bfe.admin.ch/themen/00526/00538/index.html?lang=fr>

Annexe III : Production brut d'électricité en Allemagne

Source : Stromerzeugung 1990-2013

Récupéré sur

www.ag-energiebilanzen.de

Tableau: Production brute par sources d'énergie en Allemagne, adapté par l'auteur

Production brut d'énergie électrique (en TWh)	2012	
	Production effective	%
Lignite	160,7	25,52%
Nucléaire	99,5	15,80%
Charbon	116,4	18,48%
Gaz naturel	76,4	12,13%
Mazout	7,6	1,21%
Energies renouvelables	143,5	22,79%
<i>Eolien</i>	<i>50,7</i>	<i>8,05%</i>
<i>Hydroélectrique</i>	<i>21,8</i>	<i>3,46%</i>
<i>Biomasse</i>	<i>39,7</i>	<i>6,30%</i>
<i>Photovoltaïque</i>	<i>26,4</i>	<i>4,19%</i>
Déchets	5	0,79%
Autre	25,7	4,08%
Production brut	629,8	100,00%

Adapté de Stromerzeugung 1990-2013 (Ag-energiebilanzen.de, 2014)

Annexe IV : Chiffres clés PV en Allemagne (2013)

Source : BSW-Solar statistic numbers German Solar Power industry (Solarwirtschaft.de, 2014)

Récupéré sur

http://www.solarwirtschaft.de/fileadmin/media/pdf/2013_2_BSW-Solar_fact_sheet_solar_power.pdf

Tableau : Chiffres clés PV en Allemagne (2013)

Photovoltaic (solar power) industry in Germany Profile in brief, as of end of 2013 (approx.)	
New photovoltaic (PV) capacity installed in Germany 2013 ¹	3,300 MWp
Total PV capacity installed in Germany 2013 ¹	35,700 MWp
Power generation through PV systems 2013 ²	29,700 GWh
Total number of installed PV systems at the end of 2013 ¹	1.4 million
PV share in German gross power consumption 2013 / 2020 ³	5% / 10%
CO ₂ savings in 2013 ⁴	21 million t
Number of full-time jobs by photovoltaic technology 2013 ⁵	50,000 - 65,000
Number of photovoltaic companies (incl. installers and suppliers) ⁵ of which are producers of cells, modules and other components ⁵	5,000 200
Export quota 2004 / 2013 ⁵ / 2020 ³	14% / 65% / 80%

¹ Source: Bundesnetzagentur

² internal calculations, preliminary, Source: EEX

³ BSW-Solar, according to PV-Roadmap 2020

⁴ internal calculations according BMU

⁵ preliminary estimation BSW-Solar, final data for 2013 are expected in May 2014

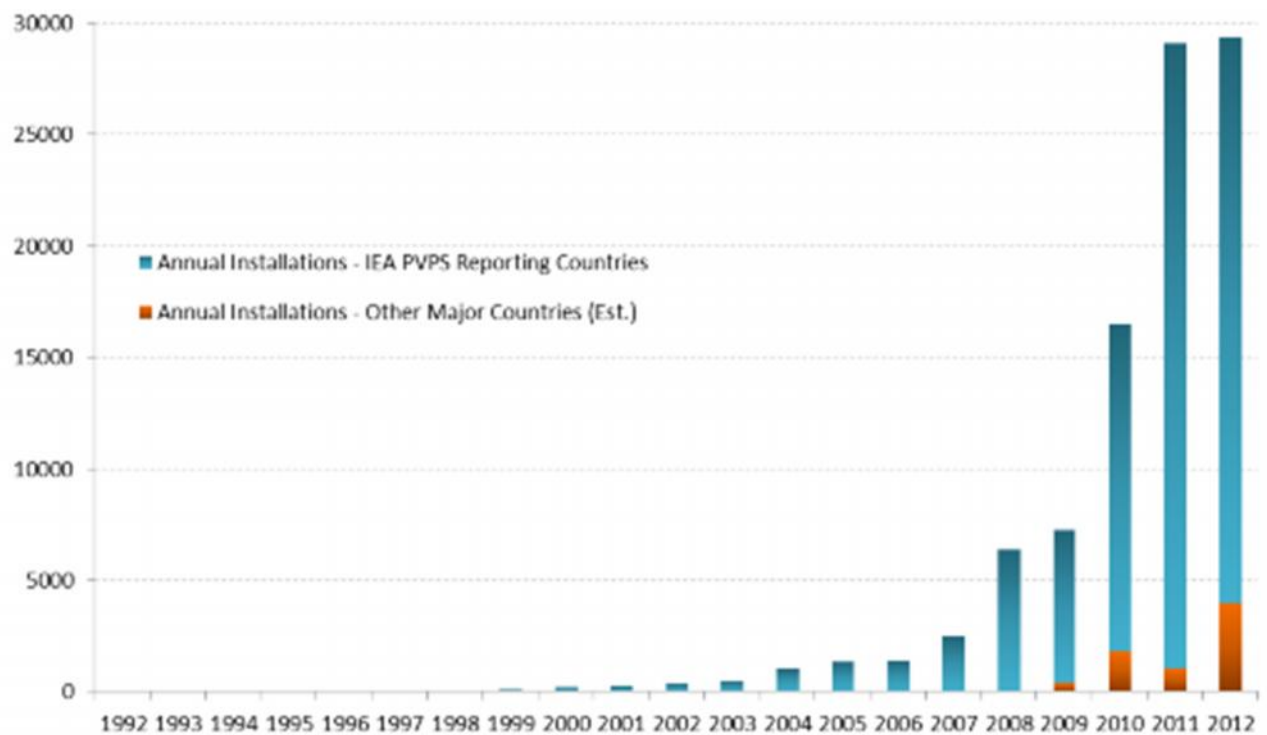
Annexe V : Démocratisation du PV dans le monde

Source : Trends 2013 in photovoltaic applications (IEA,2013, p.12)

Récupéré sur

http://iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/statistics/FINAL_TRENDS_v1.02.pdf

Figure : Evolution du nombre d'installations par année (MW)



Annexe VI : Détails des calculs pour les installations

Cette annexe contient les détails du tableau récapitulatif des coûts par installation. Nous précisons ici uniquement les paramètres et hypothèses qui diffèrent du cas de base. Les chiffres relatifs à l'autoconsommation ne sont pas présentés mais sont disponibles dans le fichier Excel en annexe.

Installation de 12 kWc (rétribution unique)

Les éléments suivants diffèrent du cas de base :

- 12 kWc de puissance, soit 84 m² de panneaux installés ;
- Production annuelle initiale de 14'100 kWh ;
- Rétribution unique de 11'600 CHF ;
- Coût de l'installation : 30'600 CHF ;
- Dette : 8'050 CHF amortissable en 25 ans, taux d'intérêt de 2,44% ;
- Tarif rachat électricité par le distributeur : 0,082⁷ CHF.

Ces changements de paramètres présentent les résultats suivants :

Tableau: Résultats financiers pour une installation de 12 kWc (rétribution unique)

Breakeven	Jamais atteint	Recettes sur 30 ans	23'253
Durée de remboursement de la dette	25 ans	Perte 30 ans	-7'347
Rendement annualisé du projet	-0,91%	Économie d'impôt globale	10'199
Prix de revient du kWh sur 30 ans (ct.)	11,71	WACC	1,66%
Rendement annuel des capitaux propres	-2,66%	VAN 30 ans	-9'578,50
		TRI 30 ans	-3,31%

Source : Données de l'auteur

Ce tableau permet de constater que cette installation n'est pas rentable. À l'expiration de l'échéance de la dette, il est nécessaire de réinvestir de l'argent liquide pour solder ce qui est encore dû. Les recettes générées par la production n'arrivent donc pas à compenser les coûts liés à l'investissement.

⁷ L'ESR rachète l'énergie électrique produite par les installations photovoltaïque au prix Swissix majoré de 25%. Les prix étant actuellement très bas, nous avons choisi comme base la moyenne des cinq dernières années (plus de précisions dans le fichier Excel en annexe).

Installation de 12 kWc (RPC)

Hormis le type de subventionnement, aucun paramètre ne diffère du cas précédent. Le tarif RPC est de 26,4 ct. par kWh. Les résultats obtenus sont les suivants :

Tableau : Résultats financiers pour une installation de 12 kWc (RPC)

Breakeven	13 ans	Recettes sur 30 ans	59'397
Durée de remboursement de la dette	10 ans	Bénéfice 30 ans	28'797
Rendement annualisé du projet	2,24%	Économie d'impôt globale	17'644
Prix de revient du kWh sur 30 ans (ct.)	11,76	WACC	1,66%
Rendement annuel des capitaux propres	5,98%	VAN 30 ans	17'912,23
		TRI 30 ans	6,06%

Source : Données de l'auteur

Cette installation s'avère être la plus rentable parmi les cas testés. En effet, la dette est remboursée en 10 ans et l'investissement commence à générer des bénéfices dès la 13^e année. Le prix de revient du kWh se trouve être légèrement plus élevé que pour le projet financé par la rétribution unique. Cela s'explique par l'impact moins important de l'effet fiscal qui s'avère être plus faible en raison de l'amortissement rapide de la dette.

Installation de 29 kWc (rétribution unique)

Pour cette installation, les paramètres suivants ont été saisis :

- 203 m² de panneaux solaire pour une puissance de 29 kWc ;
- Production annuelle initiale de 34'200 kWh ;
- Installation subventionnée au moyen 26'050 CHF provenant de la rétribution unique ;
- Le coût de l'installation se chiffre à 73'950 CHF ;
- Dette de 59'160 CHF (80%) à un taux de 2,44% sur une durée de 25 ans ;
- Tarif de rachat : 0,082 CHF.

Les résultats suivants sont obtenus :

Tableau: Résultats financiers pour une installation de 29 kWc (rétribution unique)

Breakeven	Jamais atteint	Recettes sur 30 ans	44'150
Durée de remboursement de la dette	25 ans	Perte 30 ans	-29'800
Rendement annualisé du projet	-1,70%	Économie d'impôt globale	18'210
Prix de revient du kWh sur 30 ans (ct.)	11,63	WACC	1,66%
Rendement annuel des capitaux propres	-3,75%	VAN 30 ans	-32'871,55
		TRI 30 ans	-6,53

Source : Données de l'auteur

Ce cas est le moins rentable parmi ceux testés. Malgré cela, le prix du kWh se monte à 11,63 centimes. Nous constatons que ce dernier diminue alors que la puissance installée augmente, cela indépendamment du rendement. À la vue de ces éléments, il ne serait pas judicieux de procéder à cet investissement sauf si le propriétaire consomme une partie de sa production ou opte pour la RPC.

Installation de 29 kWc (RPC)

Le tarif RPC pour cette installation est de 26,4 ct. par kWh. Les résultats obtenus sont les suivants :

Tableau: Résultats financiers pour une installation de 29 kWc (RPC)

Breakeven	15 ans	Recettes sur 30 ans	125'418
Durée de remboursement de la dette	11 ans	Bénéfice 30 ans	51'468
Rendement annualisé du projet	1,78%	Économie d'impôt globale	25'010
Prix de revient du kWh sur 30 ans (ct.)	11,72	WACC	1,66%
Rendement annuel des capitaux propres	5,13%	VAN 30 ans	28'739,95
		TRI 30 ans	4,73%

Source : Données de l'auteur

L'investissement est rentable avec la RPC. Le seuil de rentabilité est atteint au cours de la 15^e année et la dette intégralement remboursé après 11 ans. L'écart entre ces deux indicateurs augmente en fonction de quantité de fonds propres investis, qui dépend de la taille et de la puissance de l'installation.

Installation de 1 MWc (RPC)

Pour ce cas, les données suivantes ont été saisies dans la feuille Excel :

- 700 m² de panneaux installés pour une puissance de 1 MWp ;
- Production annuelle initiale de 118'0000 kWh ;
- Subventionné par la RPC à 22 ct. par kWh ;
- Coût total de l'installation de 220'000 francs financés par 80% de dette remboursable à 25 ans au taux de 3%.

Ces données permettent d'obtenir les résultats suivants :

Tableau : Résultats financiers pour une installation de 1MWc

Breakeven	17 ans	Recettes sur 30 ans	316'025
Durée de remboursement de la dette	13 ans	Bénéfice 30 ans	96'025
Rendement annualisé du projet	1,21%	Économie d'impôt globale	48'283
Prix de revient du kWh sur 30 ans (ct.)	10,78	WACC	1,66%
Rendement annuel des capitaux propres	3,93%	VAN 30 ans	39'051,30
		TRI 30 ans	3,14

Source : Données de l'auteur

Cet investissement s'avère être réalisable étant donné la VAN positive et les différents rendements observables. Il est important de relever que le tarif RPC pour cette installation est de 0,22 centimes par kWh contre 0,264 centimes pour les installations inférieures à 30 kWc.

Annexe VII : Réseau de transport suisse

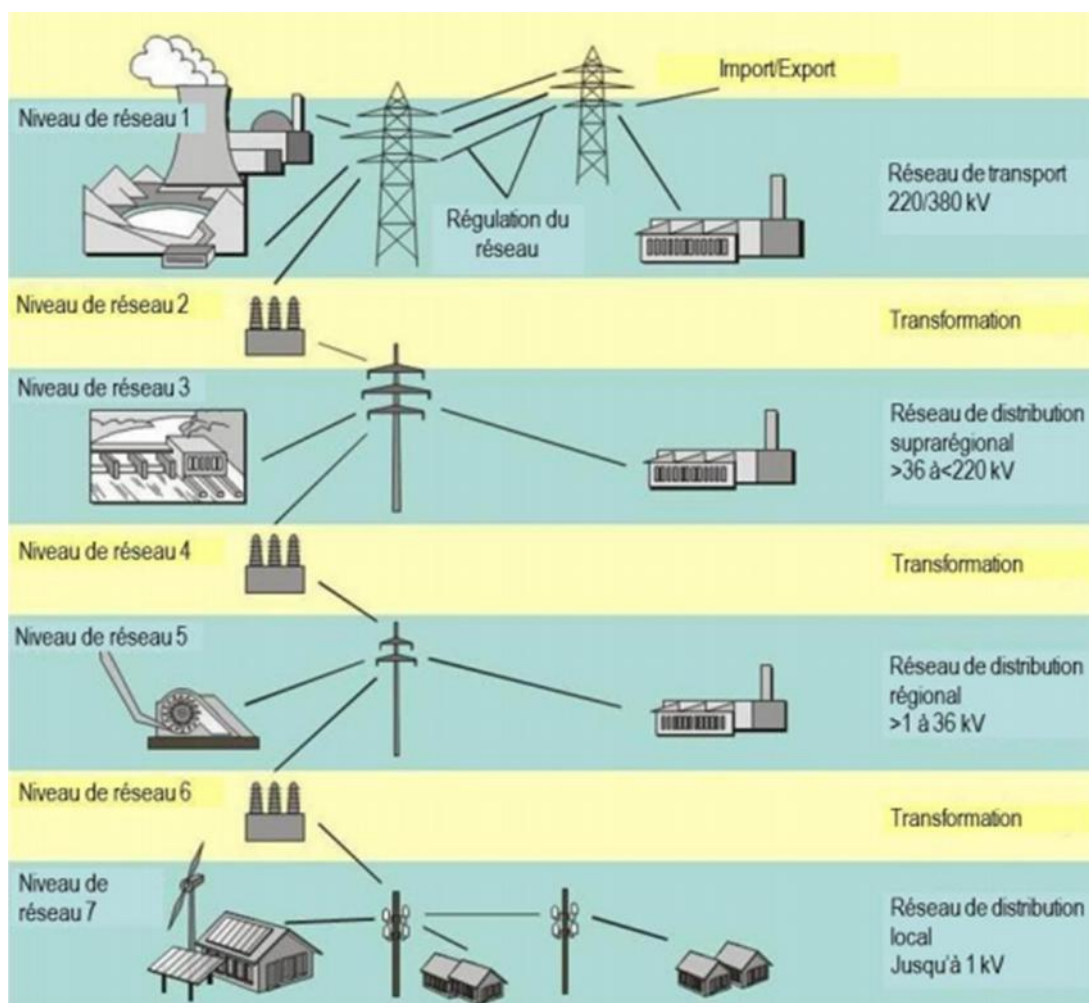
Les rôles du réseau de transport sont de transporter l'énergie produite aux consommateurs finaux et de faire transiter l'électricité entre les différents pays de l'Europe. L'illustration suivante, tirée du document "Impacts des importations et de l'injection stochastique décentralisée sur le réseau" réalisé par l'AES, présente les différents niveaux du réseau de transport suisse.

Source : Impacts des importations et de l'injection stochastique décentralisée sur le réseau (AES, 2014, p.2)

Récupéré sur

http://www.strom.ch/fileadmin/user_upload/Dokumente_Bilder_neu/010_Downloads/Basiswissen-Dokumente/21_Impacts_sur_le_reseau_fr.pdf

Figure : Constitution du réseau suisse



Déclaration de l'auteur

« Je déclare, par ce document, que j'ai effectué le travail de Bachelor ci-annexé seul, sans autre aide que celles dûment signalées dans les références, et que je n'ai utilisé que les sources expressément mentionnées. Je ne donnerai aucune copie de ce rapport à un tiers sans l'autorisation conjointe du RF et du professeur chargé du suivi du travail de Bachelor, y compris au partenaire de recherche appliquée avec lequel j'ai collaboré, à l'exception des personnes qui m'ont fourni les principales informations nécessaires à la rédaction de ce travail et que je cite ci-après : Dr Christoph Ellert. ».

Sion, le

David Monnet

Commentaires du jury

Le jury a souhaité que les modifications suivantes soient apportées à la première version du descriptif de mandat :

- Méthodologie: il ne suffit pas de contacter un seul installateur électrique
-> les données ne seraient pas valides. Merci d'adapter votre méthodologie.
- Bibliographie: pas très complète, à compléter.